

# Моделирање технолошких операција нумерички управљаних машина помоћу рачунара

*Computer Aided Process Planning and  
Computer Aided Manufacturing CAPP/CAM*

Уџбеник намењен предмету:

## **Програмирање нумерички-управљаних машина алатки 2**

на мастер академским студијама и предметима

*Програмирање нумерички-управљаних машина алатки 1*

*Планирање технолошких процеса*

на основним академским студијама

Машинског факултета Универзитета у Нишу

Аутори:

др Милош Стојковић  
др Милан Трифуновић  
др Саша Ранђеловић  
др Јелена Стојковић  
др Никола Витковић  
Рајко Турудија

Ниш 2023.



## Моделирање технолошких операција нумерички управљаних машина помоћу рачунара

Аутори: др Милош Стојковић  
др Милан Трифуновић  
др Саша Ранђеловић  
др Јелена Стојковић  
др Никола Витковић  
Рајко Турудија

Издавач: Машински факултет у Нишу  
За издавача: др Горан Јаневски, декан

Прелом, корица: Саша Ђорђевић  
Штампа: Unigraf – X – Сору, Ниш  
Тираж: 50 примерака

Рецензенти: др **Миодраг Манић**, редовни професор  
Машинског факултета Универзитета у Нишу  
др **Горан Девеџић**, редовни професор  
Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу  
др **Ацо Антић**, редовни професор  
Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду

Лектор: Валентина Дрезгић  
Донатор „TechnoNaissGroup д.о.о.“

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

621.7/.9-52(075.8)  
658.5:004.384(075.8)

**МОДЕЛИРАЊЕ технолошких операција нумерички управљаних  
машина помоћу рачунара** : computer aided process planning and  
computer aided manufacturing CAPP/CAM / аутори Милош Стојковић ... [и  
др.]. - Ниш : Машински факултет, 2023 (Ниш : Unigraf-X-Сору). - 1 књ.  
(разл. паг.) : илустр. ; 25 cm

Тираж 50. - Напомене и библиографске референце уз текст. - Библио-  
графија уз свако поглавље. - Регистар.

ISBN 978-86-6055-165-0

1. Стојковић, Милош С., 1972- [аутор]  
а) Машине алатке -- Нумеричко управљање б) CAM системи

COBISS.SR-ID 111344649

Штампање одобрило Научно-наставно веће Машинског факултета у Нишу 14.3.2023.





*Нашим студентима ...*



# Предговор

## Намена

Уџбеник је превасходно намењен студентима мастер академских студија Машинског факултета Универзитета у Нишу који похађају наставу из изборног предмета *Програмирање нумерички-управљаних машина 2* или скраћено *Програмирање НУМА 2*<sup>1</sup> (у претходној акредитацији предмет је имао назив *CAPP/CAM системи*). Међутим, садржај уџбеника је конципиран тако да не ограничава своју употребну вредност строго на поменути предмет, већ може бити од користи и свим оним студентима техничких факултета у Србији који слушају предмете везане са машинску обраду и нумерички управљане (тзв. CNC) машине. Аутори су настојали да уџбеник пружи читаоцу систематски приређена теоријска и практична знања из области моделирања операција нумерички управљаних машина, са посебним тежиштем на моделирање операција и захвата машинске обраде резањем помоћу рачунара. У уџбенику су детаљније приказани поступци моделирања операција глодања и стругања јер се те врсте операција машинске обраде најчешће и моделирају помоћу савремених рачунарских програмских апликација из групе: *Computer Aided Process Planning (CAPP)* и *Computer Aided Manufacturing (CAM)*. Такође, у уџбенику је приказана употреба *CAPP/CAM* апликација за моделирање операција обраде деформисањем, затим операције израде делова додавањем слојева материјала и операција мерења геометријске тачности израђених делова помоћу нумерички-управљаних мерних машина. И поред тога, моделирање поступака обраде деформисањем, адитивне производње и мерења приказани су у овом уџбенику у знатно ужем обиму у односу на операције глодања и стругања.

Аутори нису имали намеру да садржајем овог уџбеника имитирају тзв. упутства за употребу *CAPP/CAM* рачунарских апликација, тзв. *user guide*-ове *CAPP/CAM* софтвера, којих, нажалост, нема много, нити да на било који начин конкурише видео упутствима (*video tutorials*), која су данас све популарнија, већ да се студентима пружи свеобухватан увид у начине моделирања технолошких поступака, операција и захвата помоћу савремених рачунарских програмских апликација. Такође, намера је да материјал уџбеника пружи студентима потребна разјашњења стручних

---

<sup>1</sup> НУМА је акроним који означава *нумерички-управљане машине алатке* и даље у тексту, ради једноставности, користићемо ову скраћеницу.

термина који су присутни у области и упути их на места и услове за примену *CAPP/CAM* апликација. Веома је мали број уџбеника на енглеском језику који обрађују тему савремених *CAPP/CAM* рачунарских програмских апликација (или система). Осим пар универзитетских уџбеника, као што су „*CAD/CAM* технологије” и „Софтверска решења *CAD/CAM* система”, професора Горана Девеџића са Универзитета у Крагујевцу, и „Основе *CAD/CAE/CAM* технологија” професора Милана Зељковића са Универзитета у Новом Саду, других уџбеника из ове области нема. Уједно, и у овим уџбеницима, *CAPP/CAM* рачунарским програмским апликацијама посвећено је мање пажње него *CAD* технологијама. Дobar део уџбеника на енглеском језику који се могу наћи на тржишту, било у папирној или дигиталној форми, много више је окренут начелним разматрањима примене рачунара у индустрији или, у најбољем случају, програмирању нумерички-управљаних (CNC) машина алатки, и то, прецизније, изучавању синтаксе извршног кода. Савремене *CAPP/CAM* рачунарске апликације, својим алатима, као и могућностима које ти алати нуде, захтевају други фокус у односу на опсег садржаја уџбеника који се бави основама програмирања НУМА, односно изучавањем синтаксе извршног кода. У домену стручне литературе која се може наћи на тржишту, постоји пар упутстава (преведених књига) за коришћење рачунарских програмских апликација намењених превасходно за *CAD* и тек по нека за *CAM*. На другој страни, од почетка XXI века, након две деценије изразите економске кризе и серије ратних сукоба у бившој Југославији који су резултирали, између осталог, девастацијом индустрије, дошло је до делимичног опоравка индустријског сектора. Снажна потреба за унапређењем капацитета, праћена осавремењивањем производних средстава, као и појачаним захтевом за стручним кадром који је у стању да користи савремене рачунарске програмске апликације за моделирање операција машинске обраде, јавила се након две деценије потпуног заостајања.

Дакле, неопходност примене *CAPP/CAM* рачунарских програмских апликација у реалној индустријској пракси подстакла је ауторе да приреде један овакав уџбеник који ће користити, како садашњим и будућим студентима машинства, тако и свим ученицима техничких школа. Уједно, имајући у виду постављени циљ предмета *Програмирање НУМА 2*, уџбеник је осмишљен да оспособи студенте производног машинства да самостално користе савремене *CAPP/CAM* системе за моделирање, симулацију и анализу поступака обраде који се извршавају на НУ машинама алаткама и НУ мерно-контролним машинама. У складу са временом и концептом образовања и знања као опште цивилизацијске тековине која треба да буде доступна свима без ограничења, аутори су сматрали да уџбеник

треба издати превасходно у дигиталној форми, како би био доступан за „превлачење” преко Интернета без надокнаде.

## Концепција уџбеника

Уџбеник је конципиран на основу материјала предавања и практичне наставе на предмету *Програмирање НУМА 2* који, пре свега, обрађује област моделирања производних процеса помоћу рачунара, а који се предаје на мастер студијама Машинског факултета Универзитета у Нишу. Материјал у овом уџбенику представља наставак курса који се нуди у оквиру предмета *Програмирање НУМА 1* на основним академским студијама. С обзиром на то да се ради о врло специфичном знању, очекује се да студент, који намерава да похађа овај курс, буде већ упознат са производним технологијама и средствима, планирањем технолошких процеса, концепцијама машина алатки и основама нумеричке контроле машина алатки. Следећи препоруке тзв. Болоњског процеса, које, између осталог, налажу да се садржаји предмета на основним и мастер студијама планирају тако да се могу представити студентима у току једног семестра који траје петнаест недеља или петнаест термина за предавања и вежбања, многи од некадашњих двосеместралних предмета морали су да буду подељени у два, по садржају, мања предмета. Тако је било и са предметом који је раније био намењен студентима у области изучавања програмирања нумерички управљаних машина алатки. Изузетно брз развој рачунарске технологије, као и њен уплив у све људске делатности, укључујући и област пројектовања производа и технологије, утиче на обимност садржаја теоријског и практичног знања везаног за програмирање НУ машина. Све су то разлози брзог превазилажења оквира „једносеместралног” предмета. Уосталом, и предмет - *Програмирање НУМА* је, због превелике обимности садржаја предмета *Машине алатке за обраду резањем* и *Машине алатке за обраду деформисањем*, у једном тренутку, услед наглог раста корпуса теоријских и практичних знања у области, произашао као посебан предмет из ова два поменута предмета. Дакле, из истог разлога, предмет *Програмирање НУМА* је подељен на два дела, тако што су првом делу додељене основе програмирања НУМА, а другом напредније примене рачунарских програмских апликација за програмирање НУМА. Управо је овај други део захтевао да се систематизовано сагледају и прикажу новонастала знања у вези са применом рачунарских програмских апликација за моделирање технолошких поступака и операција, тзв. *CAPP/CAM* софтверских система.

## Структура садржаја

У првом поглављу уџбеника читалац се уводи у област моделирања технолошких поступака, операција и захвата помоћу тзв. *CAPP/CAM* рачунарских апликација. У овом поглављу је укратко приказана историја настанка *CAPP/CAM* апликација и, уједно, дата су разјашњења одредница (термина), туђица и скраћеница које су присутне у области.

У другом поглављу дат је преглед савремених *CAPP/CAM* апликација и њихове примене. Средишњи део другог поглавља пружа објашњење разлике између *CAPP* и *CAM* апликација, њихову поделу према одликама и предуслове за примену. Последњи део другог поглавља даје преглед тзв. *формата* података који се користе код ових апликација и то је истовремено и увод у треће поглавље које има централно место у уџбенику.

Треће поглавље је посвећено описивању моделирања операција обраде на НУ машинама уз помоћ *CAPP/CAM* рачунарских апликација и оно је, садржајно, најобимније. У њему су детаљно представљене методе моделирања операција и захвата обраде на НУ глодалицама и струговима. Посебно су издвојени делови који се тичу одређивања основних елемената операција, а нарочито моделирања захвата и свих етапа у поступку моделирања. Такође, у овом поглављу, читаоцу су приказане основне одлике и елементи моделирања 4-осне и 5-осне обраде глодањем. У делу који се тиче стругарске обраде, поред осталог, пружен је и садржај у вези са моделирањем високо-продуктивних операција на НУ једновретеним и вишевретеним струговима као и синхронизацијом групних захвата обраде. Једно потпоглавље је посвећено 4-осној обради контурног сечења електро-еродирањем материјала жицом, као посебной врсти операције обраде за чије моделирање је далеко продуктивније користити *CAPP/CAM* програмске апликације. Завршни део трећег поглавља је посвећен симулацији и анимацији обрадних процеса, затим изради извршног кода за управљање НУ машинама на основу изграђеног дигиталног модела операција и захвата и, напослетку, верификацији тако добијеног извршног кода.

Четврто поглавље је посвећено основама моделирања операција обраде пластичним деформисањем, а пето основама моделирања операција израде делова додавањем материјала у слојевима, тј. применом адитивних технологија уз помоћ *CAPP/CAM* рачунарских апликација. Ова поглаваља су мањег обима у односу на треће поглавље и поступци моделирања ових операција су дати са много мање детаља. С обзиром на то да се моделирање операција деформисања и операција адитивних технологија изучава у знатно већој мери на другим предметима основних и мастер академских студија, у овом уџбенику се могу наћи само основне

информације са циљем да се студентима пружи свеобухватно сагледавање примене *CAPP/CAM* апликација.

У шестом поглављу, дат је основни увид у поступке моделирања операција мерења геометријске тачности и тзв. скенирања облика. Иако ове операције нису непосредно повезане са обрадом материјала нити израдом делова (адитивним технологијама), оне ипак јесу непосредно повезане са применом *CAPP/CAM* апликација. Заправо, скоро све *CAPP/CAM* апликације имају своје модуле намењене мерењу геометрије израђених делова на НУ мерним машинама и због тога је и ово поглавље уврштено у садржај уџбеника. Такође, моделирање операција мерења геометријске тачности и скенирања геометрије делова се изучава у већој мери на другим предметима који су у вези са мерењима у машинству и тзв. реверзним инжењерством, и због тога је у овом уџбенику овој примени *CAPP/CAM* апликација посвећено само једно поглавље.

Седмо поглавље даје кратак осврт на примену непосредне нумеричке контроле, тзв. *direct numerical control* (DNC) и комуникационих протокола који се користе у савременим производним окружењима са НУ машинама.

Осмо поглавље нуди студентима кратак прилог о трендовима употребе метода вештачке интелигенције и проширене стварности у поступцима моделирања и спровођења технолошких процеса.

На крају сваког поглавља дат је преглед литературе која је коришћена током припреме материјала.

Надамо се да ће ово издање бити само прво у низу издања које желимо да представимо студентима машинства у Србији, а која ће бити допуњена новијим и детаљнијим прегледом знања и вештина у области. Из тог разлога позивамо све заинтересоване колеге из Србије из ове области, као и инжењере који раде у реалним производним окружењима на истим проблемима да нам се придруже у подухвату како би смо у скорој будућности створили збирку дигиталних издања посвећену моделирању технолошких процеса применом рачунарских програмских апликација. Уверени смо да би једна таква збирка била од изузетне важности за домаће привредне субјекте.

На концу, желимо да се захвалимо предузећу *Techno Naiss Group* д.о.о. из Ниша које је препознало наш напор као вредан покушај који треба подржати и омогућило нам да се обави одговарајућа лектура рукописа, као и потребна техничка припрема за штампу и израду дигиталног издања.





## Садржај

<b>1</b>	<b>Увод: <i>CAPP / CAM</i> системи историја, садашњост и трендови.....</b>	<b>1-1</b>
1.1	Дефиниције и језичке одреднице у области (Терминологија) .....	1-3
1.2	Кратка историја појаве <i>CAPP / CAM</i> система.....	1-10
	Литература .....	1-14
<b>2</b>	<b><i>CAPP / CAM</i> системи .....</b>	<b>2-15</b>
2.1	Места примене и подела <i>CAPP / CAM</i> апликација .....	2-17
2.1.1	Разлика између <i>CAPP</i> и <i>CAM</i> апликација .....	2-28
2.1.2	Варијантни, генеративни и хибридни <i>CAPP</i> системи.....	2-30
2.1.3	Предуслови за примену <i>CAPP/CAM</i> система.....	2-41
2.2	Улазно-излазни формати података у <i>CAPP/CAM</i> апликацијама .....	2-43
	Литература .....	2-60
<b>3</b>	<b>Моделирање операција обраде резањем.....</b>	<b>3-63</b>
3.1	Постављање основних елемената технолошког поступка.....	3-65
3.1.1	Постављање (подешавање) параметара машине .....	3-69
3.1.2	План стезања и оријентација припремка/обратка/изратка у склопу .....	3-73
3.1.3	Подешавање збирки алата обраде у <i>CAPP/CAM</i> апликацијама .....	3-82
3.2	Моделирање захвата обраде (резањем) .....	3-86
3.2.1	Моделирање захвата обраде глодањем .....	3-88
3.2.2	Моделирање операција контурних сечења .....	3-143
3.2.3	Моделирање операција обраде стругањем .....	3-152
3.3	Симулација и анализа .....	3-216
3.3.1	Визуелизација захвата и операција .....	3-218
3.4	Израда извршног програма и верификација .....	3-224
3.4.1	Поступак израде извршног програмског кода.....	3-224
3.4.2	Израда листе операција и захвата ( <i>process table</i> ).....	3-224
	Литература .....	3-224
<b>4</b>	<b>Моделирање операција обраде деформисањем .....</b>	<b>4-224</b>
4.1	Операција пробијања и просецања .....	4-224
4.2	Операције савијања .....	4-224
4.3	Операције спајања лимова пластичном деформацијом.....	4-224
4.4	Операције дубоког извлачења .....	4-224
4.4.1	Дубоко извлачење са стањењем дебљине зида .....	4-224
4.5	Операције финог пробијања и просецања .....	4-224
4.6	Операције ковања .....	4-224
4.6.1	Топло ковање у отвореним алатима .....	4-224
4.6.2	Топло ковање у затвореним алатима .....	4-224
4.6.3	Ротационо ковање .....	4-224
4.6.4	Хладно ковање у затвореном алату .....	4-224
	Литература .....	4-224

<b>5</b>	<b>Моделирање операција адитивних производних процеса ..</b>	<b>5-224</b>
5.1	Кратак преглед историје 3D штампе .....	5-224
5.2	Адитивни производни процес .....	5-224
5.3	Рачунарске апликације за моделирање адитивне производње .....	5-224
5.3.1	CAPP/CAM рачунарске програмске апликације за FDM .....	5-224
5.3.2	CAPP/CAM рачунарске програмске апликације за технолошке поступке израде фотополимеризацијом .....	5-224
5.3.3	Одлике софтвера за моделирање FFF/ FDM процеса адитивне производње .....	5-224
	Литература .....	5-224
<b>6</b>	<b>Моделирање операција мерења геометрије .....</b>	<b>6-224</b>
6.1	Појам скенирања физичких објеката .....	6-224
6.2	Процес скенирања .....	6-224
6.2.1	Бесконтактне методе .....	6-224
6.2.2	Контактне методе .....	6-224
6.3	Координатне мерне машине .....	6-224
6.3.1	Тачност СММ-а .....	6-224
6.3.2	Конструктивна извођења картезијанских СММ-а .....	6-224
6.3.3	Конструктивне одлике некартезијанских СММ-а .....	6-224
6.3.4	Карактеристике мерне опреме СММ-а .....	6-224
6.3.5	Софтвер СММ-а .....	6-224
6.4	Поступак скенирања геометрије .....	6-224
6.4.1	Дефинисање параметара скенирања .....	6-224
6.5	Поступак моделирања операција мерења геометрије помоћу CAPP/CAM апликације .....	6-224
	Литература .....	6-224
<b>7</b>	<b>DNC и комуникациони протоколи .....</b>	<b>7-224</b>
7.1	Разлози за примену DNC система .....	7-224
7.2	Комуникација DNC систему .....	7-224
7.2.1	Методе за учитавање извршног програма .....	7-224
7.3	DNC концепти .....	7-224
7.3.1	Мрежна технологија за DNC системе .....	7-224
7.4	Модерни DNC - платформа за „дигиталну производњу” .....	7-224
	Литература .....	7-224
<b>8</b>	<b>CAPP/CAM системи у индустрији 4.0 + .....</b>	<b>8-224</b>
8.1	Уградња вештачке интелигенције у CAM .....	8-224
8.2	Проширена стварност у CAM .....	8-224
8.2.1	Кратка историја AR-а .....	8-224
8.2.2	Компоненте AR-а .....	8-224
8.2.3	Примена AR-а .....	8-224
	Литература .....	8-224
<b>9</b>	<b>Додатак .....</b>	<b>9-224</b>

# 1 Увод: *CAPP* / *CAM* СИСТЕМИ ИСТОРИЈА, САДАШЊОСТ И ТРЕНДОВИ

---

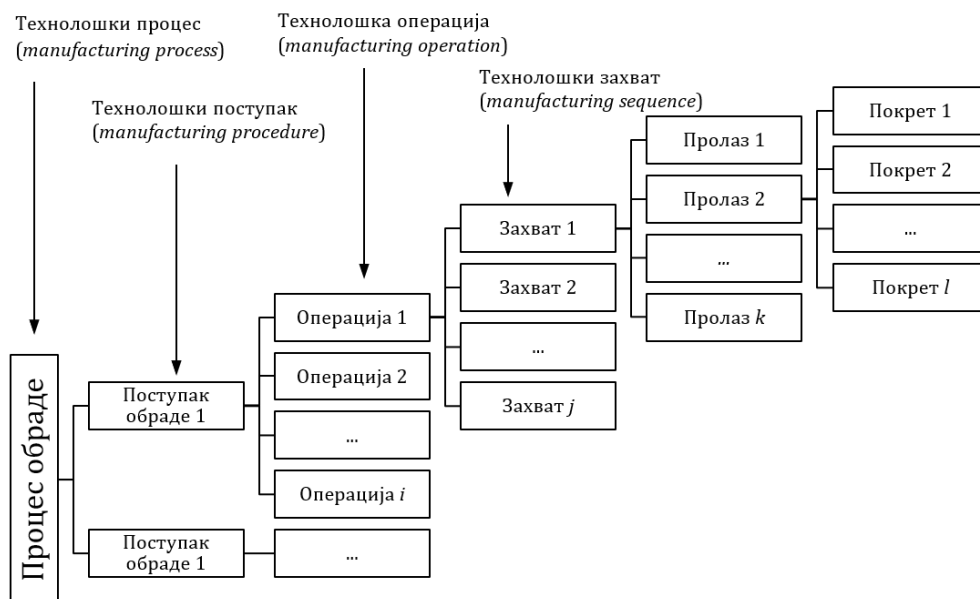
- 1.1 Дефиниције и језичке одреднице у области (Терминологија)
- 1.2 Кратка историја појаве *CAPP* / *CAM* система  
Литература



## 1.1 ДЕФИНИЦИЈЕ И ЈЕЗИЧКЕ ОДРЕДНИЦЕ У ОБЛАСТИ (ТЕРМИНОЛОГИЈА)

На самом почетку, пре појашњења појединих одомаћених одредница и акронима из енглеског језика које су у вези са предметом уџбеника (моделирање технолошких процеса), подсетимо се одређених дефиниција:

*Технолошки процес* је део производног процеса у коме се врши стварање материјалних добара обављањем низа обрадних (технолошких) поступака над улазном сировином или полупроизводом. Тим поступцима обраде врши се промена облика, димензија, механичких и других особина улазне сировине или полупроизвода и тако ствара нови полупроизвод или готов, завршни производ. Такође, битно је истаћи да се приликом осмишљавања, а потом и прописивања поступака обраде по којима ће се вршити спровођења обраде, тежи остваривању максималног учинка и циљаног квалитета произведеног добра уз минималне губитке, минимална улагања и нормалан људски рад. Сваки технолошки процес се састоји од више технолошких поступака, а сваки технолошки поступак од више операција обраде, свака операција од више захвата обраде, сваки захват од више пролаза и, коначно, сваки пролаз од више покрета (Слика 1-1).



**Слика 1-1** Разврставање чланова технолошког процеса (процеса обраде или спровођења обраде).

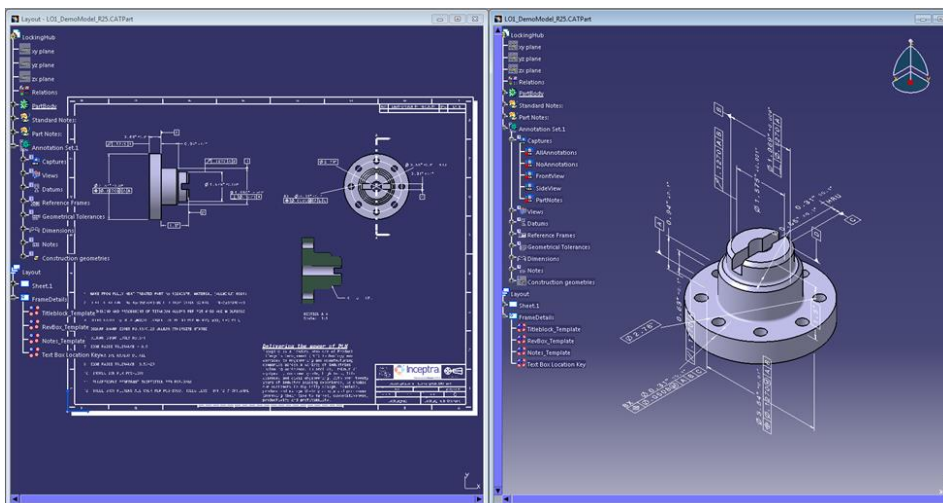
Одредница *технолошки поступак* се односи на скуп свих обрадних радњи (операција) које се обављају на низу сродних машина (у погледу врсте обраде) следећи прецизно утврђен редослед и користећи одговарајуће алате, прибор и остала неопходна средства обраде на тачно прописан начин. *Операција обраде* или технолошка операција подразумева једну врсту обрадне радње која се обавља на једној (врсти) машини, а која се спроводи у виду једног или више обрадних захвата или *обрада* истовремено или сукцесивно према прецизно утврђеном редоследу и користећи одговарајуће алате, прибор и остала неопходна средства обраде на тачно прописан начин. *Захват* је основни елемент обрадног процеса и подразумева извршно (обрадно) дејство једног или више алата истовремено на један предмет обраде као и помоћне активности које се спроводе на тачно прописан начин.

*Пројектовање*<sup>1</sup> *технолошких процеса* је одредница која се уврежила у домаћој стручној јавности и потиче из времена када се користио израз *пројектовање* машинских делова што се често сматра синонимом за *конструисање* машинских делова. Резултат пројектовања, односно конструисања машинских делова је техничка документација, то јест, скуп техничких радионичких и склопних цртежа на којим се представља, пре свега геометрија, а потом и сви остали подаци који указују на функцију и начин производње таквог машинског дела или склопа. Док су се некада технички цртежи непосредно исцртавали на папиру, данас је све више дигиталних докумената, тзв. датотека, које се, у зависности од формата (начина дигиталног записа) могу приказивати у облику димензионалних представа (нпр. технички цртеж који може бити одштампан на папиру) или тродимензионалних представа на мониторима рачунара (Слика 1-2) или визирима уређаја за проширену стварност. Резултат *пројектовања технолошких процеса* је детаљно упутство о спровођењу поступака обраде и свих радњи обраде (*план обраде*). Имајући то у виду, одредници *пројектовање технолошког процеса* највише би одговарала одредница *прописивање поступка обраде*. Иако се често у пракси поистовећује *пројектовање* и *планирање технолошког процеса*, треба истаћи да су то ипак два различита појма. Планирање технолошког процеса је појам који одређује „шири” скуп активности који садржи и актив-

---

<sup>1</sup> Одредница **project** потиче од латинске именице *projectum* и глагола *proicere*, „пре радње”, што заузврат долази од *pro-*, што означава првенство, нешто што долази испред нечег другог у времену (паралелно са грчким *про*) и *iacere*, „урадити”. Реч „пројекат” је тако првобитно значила „пре радње”. Дакле, пре спровођења поступка обраде, претходно се осмисли и пропише редослед и садржај обрадних радњи које треба потом спровести. Дакле, *пројектовање технолошког процеса* би могло да се преведе као *осмишљавање* или *прописивање поступка обраде*.

ност пројектовања технолошког процеса. Планирање технолошког процеса укључује низ активности којима се врши планирање извршења потребних *прописаних поступака обраде* у расположивом временском периоду, узимајући у обзир ограничења датог технолошког система у погледу расположивих производних средстава и других материјалних и људских ресурса потребних да се ти технолошки процеси успешно обаве.



а) б)

**Слика 1-2** Приказ техничког цртежа у 2D а) и 3D б) дигиталним представама.<sup>2</sup>

Према ГОСТ стандарду 14.301-73<sup>3</sup> (Општа правила развоја технолошких процеса и избора технолошке опреме), *пројектовање процеса обраде* обухвата следеће активности:

1. избор припремка;
2. избор технолошких база;
3. избор типског технолошког процеса;
4. одређивање садржаја и редоследа операција обраде;
5. дефинисање, избор и наручивање нових технолошких средстава и опреме (укључујући средства за контролу и испитивање);
6. утврђивање и прорачун режима обраде;
7. утврђивање норматива процеса;
8. утврђивање знања и вештина (квалификације) извођача технолошког процеса;
9. организација производних места;

<sup>2</sup> Слика је преузета од Inceptra <https://www.inceptra.com>

<sup>3</sup> <https://files.strovinfr.ru/Data2/1/4294687/4294687648.pdf>

10. избор средстава аутоматизације технолошких процеса и транспортних средстава;
11. израда просторног распореда погона и разрада кретања предмета обраде и отпадног материјала;
12. формирање радне документације за технолошке процесе.

Приликом пројектовања или прописивања технолошког процеса инжењер-технолог најпре врши сагледавање дела или склопа из три аспекта: геометријски, употребно (функционално) и технолошки, а потом приступа разради технолошких поступака за његову израду. Чиниоци који утичу на то какав ће технолошки процес бити прописан су:

1. количина производа (делова) који се израђују – серије;
2. степен хитности израде - расположиво време;
3. очекивана вредности производа (цена);
4. облик и сложеност дела;
5. величина дела и полазног облика;
6. толеранције димензија и положаја;
7. квалитети површина;
8. врста и стање материјала обраде;
9. врста и организација производње и технолошка дисциплина;
10. расположива опрема обрадног система (машине, алат, прибор);
11. материјална могућност производног система;
12. расположиви људски капацитети, и др.

Приликом разраде технолошког процеса, инжењер анализира геометријске и функционалне одлике дигиталног 3D модела или техничких цртежа и сагледава који поступци обраде су потребни. Ако није дефинисан припремак, бира најпогоднији облик и величину припремка. Затим, идентификује технолошке и мерне базе и дефинише базе за позиционирање. За сваку операцију обраде, бира машину и прибор за стезање и позиционирање. Такође, врши детаљну разраду сваке операције на захвате, бирајући или пројектујући алате за сваки захват. Утврђује (бира или прорачунава) параметре и одлике сваког захвата тежећи да оствари циљани квалитет уз минимална улагања и ангажовања: скрати време обраде, смањи губитке и обезбеди максималну искоришћеност ангажоване опреме и људства. Коначно, по завршеном пројектовању технолошког процеса, израђује детаљну документацију и упутства неопходна за обављање и контролу прописаних поступака обраде у току спровођења.

С обзиром на то да се за пројектовање, односно конструисање машинских делова и склопова, као и за пројектовање и планирање технолошких процеса користе одговарајуће рачунарске програмске апликаци-



је, резултати тих активности су *дигитални модели* делова и склопова, односно *дигитални модели* процеса. Из тог разлога, можда је најисправније рећи да се машински делови и склопови као и технолошки процеси за њихову израду, *моделирају* помоћу рачунарских програмских апликација.

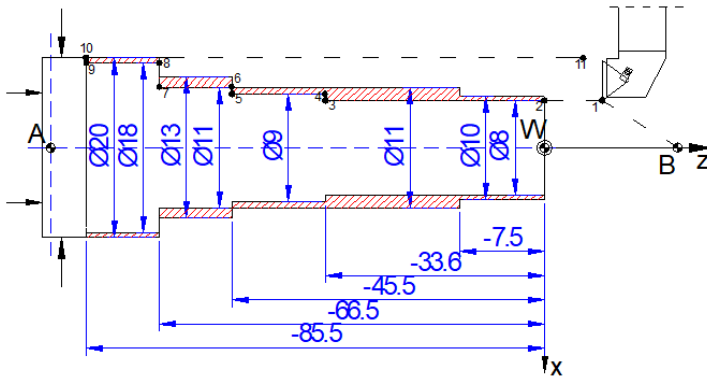
Због свеобухватног уплива рачунарске, односно информатичке технологије у процес конструисања, инжењерских анализа и планирања, као и прописивања технолошких поступака обраде, савремено машинство се не може замислити без кованица из енглеског језика и њима одговарајућих акронима које се брзо одомаћују у стручном језику. Ипак, често, многе од њих немају најјасније значењско одређење у нашем језику. Из тог разлога, на самом почетку овог уџбеника, биће изнето кратко разматрање значења два акронима који ће се веома често помињати у тексту.

Енглеска кованица *Computer Aided Process Planning*<sup>4</sup> или, скраћено, акроним *CAPP* је стручна одредница која се одомаћила у српском стручном речнику (машинске струке, пре свега), којом се означава посебна врста рачунарских програмских апликација намењених изради тзв. *плана производног процеса* или *плана производње*. Значење одреднице *производни процес* може бити веома широко због тога што се производни процес или процес производње може односити на веома разнолике производе, али и услуге, нпр. процес производње филма или процес производње здравствених услуга. Ипак, у реалности, *CAPP*<sup>5</sup> је намењен знатно ужем скупу производних процеса и то пре свега у области машинства где геометрија и функционалне одлике дела представљају улазни скуп података, а резултат примене ових апликација је *операциони план* (*план обраде*). *План обраде*, притом, подразумева књигу технолошких упутстава, тзв. *операционих листа*, у којима је представљен детаљни опис технолошког процеса и, у њему, садржаних технолошких поступака, операција и захвата обраде којима се припремак претвара у жељени производ или израдак (Слика 1-3).

---

<sup>4</sup> Дословни превод кованице би могао бити „рачунаром потпомогнуто планирање процеса”.

<sup>5</sup> Даље у тексту ће се користити само акроним „*CAPP*” уместо „*CAPP* рачунарске програмске апликације”.

Универзитет у Нишу Машински факултет	Групни технолошки поступак	Бр.группне операције	
	Технолошка студија (инструкцијски лист): за Вратило	Бр. типског постипка	
Машина: НУ струг	Назив операције: Стругање	Бр.операције	40.
Материјал: Č. 1530			
Облик материјала: Цилиндар			
Број операција и захвата. Скица захвата. Опис		Групни стезни, резни и контролни алати. Назив и број.	
40.120. Груба уздужна спољашња обрада спољашње сложене површине		Нож за уздужну грубу спољашњу обраду PTGNL2020K11 TNMG110408 FL15 P20	
			

**Слика 1-3** Детаљ са операцијског листа машинске обраде на стругу (конвенционални приступ).

Типичан план обраде садржи податке о машинама и алатима којима ће се вршити обрада припремка, затим о помоћном алату и прибору који ће, такође, бити коришћен у процесу обраде, али и за проверу остварења производног процеса, односно за контролу квалитета. Поред података о средствима за обраду и контролу, план производње садржи и детаљна упутства о начину примене тих средстава, односно о тзв. параметрима обраде укључујући и процењена времена (главна, помоћна и припремно-завршна). Коначно, све ове податке прате и одговарајући цртежи којима се, на најбољи могући начин, настоји приказати сваки захват са свим његовим детаљима укључујући и путању алата, на пример.

Према томе, CAPP помаже пројектанту технолошких процеса и поступака да брже и једноставније (у односу на традиционални приступ) изради план обраде у дигиталном запису који, потом, може бити веродостојно симулиран, те према томе и детаљније разматран и коначно

оптимизован. Такође, дигитални запис плана омогућава брзу (тренутну) размену информација између свих чланова производног процеса<sup>6</sup>.

Одредница *Computer Aided Manufacturing*<sup>7</sup> или, скраћено, *CAM* је опште прихваћен стручни термин којим се, превасходно, означава посебна врста рачунарских програмских апликација намењених моделирању и контроли спровођења технолошких поступака<sup>8</sup> обраде (и израде) производа. У нашем језику, ради преузимања, односно увођења овог енглеског акронима у редовну стручну употребу, често се додаје и суфикс *систем* или *програмски пакет* и из тог разлога најчешће у употреби налазимо сложени термин *CAM систем* или *CAM програмски пакет* или само *CAM програм*. Дакле, *CAM систем* је *рачунарска програмска апликација за моделирање и контролу остваривања технолошких поступака израде производа*. Полазећи од оваквог терминолошког одређења чини се неопходним додатно појашњење сложенице, односно појашњење у вези са одредницама *моделирање*, *технолошки поступак обраде* и *производ* у сложеници. Заправо, потребно је прецизирати на које *моделирање*, затим, на које *технолошке поступке израде* и на које *производе* се те одреднице, у поменутој сложеници, односе. Кренимо од одреднице *моделирање* која се овде употребљава да опише стварање дигиталног модела технолошког поступка израде који обухвата стварање *дигиталних модела* свих елемената технолошког поступка, односно: предмета обраде, средстава којима се врши обрада (машине, алата којим се врши обрада, стезног алата и додатног прибора), али и самих технолошких параметара као и других битних одлика поступка обраде. Коначна сврха моделирања, односно стварања дигиталног модела технолошког поступка (ТП) је рачунарска симулација извођења обраде, а потом анализа и евентуална оптимизација ради постизања различитих циљева, најчешће ради остварења максималне продуктивности и квалитета поступка обраде уз минималне трошкове. Дакле, симулација обрадних радњи помаже (пројектанту ТП) да, пре него што приступи спровођењу поступка обраде у реалности, има могућност провере ваљаности моделираног поступка

---

<sup>6</sup> У чланове производног процеса убрајају се људски ресурси ангажовани у остварењу плана (непосредни извршиоци, оператери и супервизори и др.), али и машине које, посредством сензора и дигиталне комуникације, учествују у пуној мери у размени информација, омогућавајући оптимално остварење плана обраде и целокупног производног процеса.

<sup>7</sup> Оваква кованица би могла да се дословно, а истовремено семантички довољно прецизно, преведе у одредницу: „рачунаром потпомогнута производња”.

<sup>8</sup> У даљем тексту одредница *технолошки поступак* (или скраћено ТП) подразумева скуп свих обрада на предмету обраде које се изводе на одговарајућим машинама уз примену потребних алата, мерног, стезног и помоћног прибора, као и адекватних режима обраде.

обrade. Одредница *технолошки поступак*, у горе поменутој сложеници, може се односити на веома разноврсне технолошке поступке обраде, од ТП израде прехранбених производа, преко ТП површинске заштите металних делова до ТП склапања или монтаже сложених производа какви су нпр. аутомобили. CAM програмска апликација може бити посебно развијена за потребе моделирања и контролу остваривања специфичног технолошког поступка. Према томе, CAM програмска апликација се може односити на веома разнолик скуп технолошких поступака. Ипак, у пракси, најчешће се срећемо са CAM апликацијама којима се моделирају технолошки поступци машинске обраде материјала резањем и нешто ређе пластичним деформисањем. Од технолошких поступака машинске обраде материјала резањем, најзаступљеније су оне CAM програмске апликације којима се моделирају операције глодања и стругања, јер су то сложене операције обраде у погледу кретања алата и обратка. У том случају употреба рачунара у великој мери помаже пројектанту ТП при моделирању операција и захвата обраде на ефикасан начин. Такође, постоје посебне CAM апликације (или посебни модули општих CAM апликација) који су намењени моделирању операција контурног сечења, попут сечења ласером, воденим млазом, плазмом, и електро-ерозијом жицом. Из раније изложеног јасно је да се одредница *производ* у сложеници *рачунарска програмска апликација за моделирање технолошких поступака израде производа* односи најчешће на делове који се обрађују на машинама алаткама за машинску обраду резањем, пре свега глодалици и стругу, а затим и машинама за контурно сечење.

## 1.2 КРАТКА ИСТОРИЈА ПОЈАВЕ CAPP / CAM СИСТЕМА

Сматра се да је 1965. године први пут приказана идеја о могућностима коришћења рачунара за дефинисање технолошког процеса (Niebel 1965). Следеће године Schenk је одбранио докторску тезу на тему могућности употребе рачунара за аутоматизацију планирања технолошког процеса, а у исто време, између 1966. и 1968., на другој страни света, у Француској, инжењер Реноа, Pierre Bézier, представио је прву рачунарску програмску апликацију за тродимензионално моделирање геометрије машинских делова, тзв. 3D CAD софтвер - UNISURF,<sup>9</sup> који се сматра „родитељем” многих CAD апликација које ће касније настати према узор на UNISURF. Нагли развој CAD апликација подстакао је и развој CAPP и CAM апликација. Ипак, све до раних 90-тих година XX века, када су персонал-

---

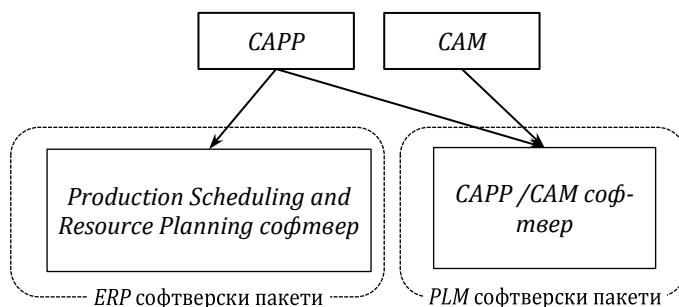
<sup>9</sup> <https://www.thomasnet.com/insights/the-history-and-future-of-cad-cam-technology/>

ни рачунари постајали све присутнији у индустријској пракси, тзв. *Computer Aided* апликације (*-Design, -Engineering, -Process Planning, -Manufacturing* и др.) биле су ретке и скупе, тако да су углавном развијане за потребе већих предузећа из авио- и ауто-индустрије, од којих се могло очекивати да ће вратити велике инвестиције у развој оваквих рачунарских програмских апликација. *CAM* апликације су у периоду до појаве персоналних рачунара превасходно биле инсталиране на индустријским рачунарима који су контролисали рад нумерички управљаних машина алатки за обраду резањем (нпр. НУ глодалице и стругови). У међувремену, 1976. године, на конференцији „1976 NC Conference” приказана је прва *CAPP* апликација под називом „*CAPP System*” која је била развијена од стране *CAM-I* конзорцијума (*Computer Aided Manufacturing-International*). Те исте године приказана је још једна *CAPP* апликација – *MIPLAN*, која је била развијена од стране организације *OIR* (*Organization of Industrial Research*). Обе апликације су приказале тзв. *варијантни* приступ пројектовања који је омогућавао избор унапред спремљених варијанти технолошких поступака. 1977. године Wysk је у својој докторској дисертацији представио *CAPP* апликацију под називом *APPAS* која је по први пут приказала тзв. *генеративни* приступ пројектовања технолошких поступака, где је корисник имао могућност избора унапред дефинисаних детаља или одлика технолошких операција. Поред светских достигнућа у домену *Computer Aided* технологија, вреди споменути концептуалне рачунарске програмске апликације за пројектовање геометрије ротационих машинских делова и планирање технолошких поступака *CADROT* и *CAPPROT*, које је развијао тим истраживача на Машинском факултету, Универзитета у Нишу, предвођен проф. Драганом Домазетом и његовим сарадницима: Мирославом Трајановићем, Миодрагом Манићем и Драганом Мишићем у периоду од 1985. до 1994. године. Ове апликације су у то време, упоредо са познатим светским центрима за развој ове врсте апликација, представиле веома напредни концепт који ће пар година касније постати познат и општеприхваћен као тзв. *feature-based* концепт. Данас сви савремени *CAD, CAPP, CAM* системи користе *feature-based* концепт који омогућава моделирање геометрије комбиновањем унапред дефинисаних геометријских форми (*design feature-a*) чије се димензије могу мењати променом одговарајућих променљивих, тзв. параметара геометријских форми (нпр. променљива која дефинише пречник цилиндричне форме). Моделирање технолошког поступка се, такође, одвија комбиновањем већ припремљених технолошких захвата (*manufacturing operation feature-a*) чије се одлике могу, такође, подешавати променом вредности променљивих – параметара (нпр. променљива која дефинише тип путање глодала).

Период који је уследио након 90-их година био је обележен изузетним растом примене рачунара у индустрији и свакодневном животу. Истом динамиком развија се и плејада Computer Aided софтвера. Појављују се, такође, произвођачи софтвера који ће, у годинама које следе, прерасти у својеврсне привредне гиганте који и данас доминирају тржиштем *Computer Aided* софтвера попут *Dasault Systemes*, *PTC*, *AutoDesk*, *Siemens NX* (некадашњи *Unigraphics*). Они ће диктирати тренд аквизиције мањих произвођача софтвера из домена *CAD*, *CAE*, *CAPP*, *CAM* и др. и њихово интегрисање у свеобухватна решења за развој и производњу производа помоћу рачунара, тзв. *Product Lifecycle Management* софтверске пакете. Ипак, добар број самосталних произвођача *CAD*, *CAE* и *CAM* софтвера успео је да опстане на тржишту и да данас понуди алтернативна и моћна решења попут *Rhinoceros (CAD)*, *Ansys (CAE)* и *Master CAM* на пример.

За нашу причу о историји *CAPP* и *CAM* система, битно је разумети још један тренд који се јавио у том периоду. Већина произвођача комерцијалних *CAPP* апликација, које су биле развијане у то време, определила се за примену хибридног (варијантно-генеративног) приступа моделирања технолошких поступака. Уједно, произвођачи софтвера су убрзо увидели да је корисницима неопходан софтверски пакет који обједињује функционалности *CAPP* и *CAM* апликација и тако је велика већина савремених *CAPP/CAM* апликација прерасла у јединствени софтверски пакет и као такви се налазе на тржишту (Слика 1-4). Већина *CAPP/CAM* софтвера је, у својим трговачким називима, задржало акроним *CAM* (*Master CAM*, *Gibbs CAM* и др.) док је акроним *CAPP* остао да постоји (скоро само) у научној литератури због жеље да се јасно означи граница домена функције једне и друге врсте софтвера.

Историјски посматрано, један низ *CAPP* апликација, односно један скуп функционалности који је иницијално био садржан у *CAPP* програмима, а који се односи на планирање времена спровођења технолошког поступка као и планирање оптерећења и ангажовања ресурса производног погона (предузећа), „преселио” се у посебну врсту рачунарских програмских апликација које данас припадају групи *Enterprise Resource Planning (ERP)* софтверских пакета (Слика 1-4). Те апликације можемо данас наћи под више различитих одредница: *Production Scheduling and Resource Planning (PSRP)*, *Production Planning and Scheduling (PPS)*, *Advanced Production Scheduling (APS)* и др.



**Слика 1-4** Приказ трансформације *CAPP/CAM* апликација у две класе софтвера током времена.

За предмете студија машинства, којима је овај уџбеник намењен (Програмирање НУМА 2, Програмирање НУМА 1, Планирање технолошких процеса), од превасходног интереса су тзв. *CAPP/CAM* апликације којима се детаљно моделирају технолошки поступци конвенционалне и неконвенционалне машинске обраде. Према томе, садржај уџбеника ће бити, пре свега, посвећен изучавању функционалности тих *CAPP/CAM* апликација.

## ЛИТЕРАТУРА

- Alting, L., Zhang, H. (1989). Computer Aided Process Planning: The State-of-the-Art Survey, International Journal of Production Research, 27(4) 553-585. doi: 10.1080/00207548908942569
- Chang, T. C., Wysk, R. A., Wang, H. P. (2006) Computer Aided Manufacturing (3rd ed.), Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-142919-1
- Devedžić G. B. (2004). Softverska rešenja CAD/ CAM sistema, Mašinski fakultet univerziteta u Kragujevcu. ISBN 86-80581-67-4
- Devedžić, G. B. (2009). CAD/ CAM tehnologije, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta Kragujevcu ISBN 978-86-86663-40-5
- Niebel B. W., 1965, Mechanized process selection for planning new designs. ASME paper, No. 737
- Schenk, D. E., 1966, Feasibility of automated process planning, Ph.D. thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- Wang, X., Bi, Z. (2020). Computer Aided Design and Manufacturing (1st ed.), John Wiley & Sons Ltd. ISBN 9781119534211
- Wysk, R. A., 1977, An automated process planning and selection program: APPAS. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Зељковић, М. Табаковић, С., Живковић, А., Живановић, С., Млађеновић, Ц., Кнежев, М. (2018). Основе CAD/CAE/CAM технологија. Едиција „Техничке науке“, Департман за производно машинство, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.



## 2 *CAPP / CAM* СИСТЕМИ

---

- 2.1 Места примене и подела *CAPP / CAM* апликација
    - 2.1.1 Разлика између *CAPP* и *CAM* апликација
    - 2.1.2 Варијантни, генеративни и хибридни *CAPP* системи
    - 2.1.3 Предуслови за примену *CAPP/CAM* система
  - 2.2 Улазно-излазни формати података у *CAPP/CAM* апликацијама
- Литература



## 2.1 МЕСТА ПРИМЕНЕ И ПОДЕЛА *CAPP / CAM* АПЛИКАЦИЈА

Као што је то већ делимично изнето у претходном поглављу, може се рећи да где год постоји производња, било производа или услуга, постоји и прописани поступак израде тог производа, односно услуге. Самим тим, може постојати потреба за применом информационих технологија, односно за применом одговарајуће рачунарске програмске апликације како би се планирање, прописивање (моделирање) технолошког поступка, као и контрола његовог спровођења, аутоматизовала. Кључне предности које се могу очекивати од аутоматизације ових активности јесу, пре свега, убрзање њиховог извршења и умањење појаве грешака, односно отказа. Имајући у виду да се кључни показатељи утицаја неког производног и технолошког система најчешће исказују у погледу:

1. продуктивности;
2. трошкова;
3. времена;
4. квалитета (ваљаности) производа;
5. прилагодљивости, агилности и реактивности;
6. безбедности учесника и околине;
7. одрживости, и
8. иновативности,

јасно је да већа брзина планирања и контроле спровођења технолошког поступка, последично, скраћује време технолошке припреме производње остављајући више времена за анализу и оптимизацију технолошког поступка. Такође, остаје више времена за обављање потребних измена које би резултирале увећањем прилагодљивости процеса на могуће честе промене захтева које пристижу из пословног система. Смањење броја грешака током планирања и спровођења технолошког поступка, односно обављања прописаних операција обраде непосредно унапређује ваљаност (квалитет) производа. Грешке могу бити ненамерне (превиди), али и последица недовољног знања и непоседовања информација о процесу. Више времена и могућности за сагледавање и разматрање утицаја прописаних операција обраде на учеснике у процесу и околину, може се искористити за планирање и прописивање мера унапређења безбедности тих учесника и околине. На крају, све претходно наведено, увећава способност технолошког система да ствара већу количину квалитетних производа (материјалних добара) спрам јединице уложених средстава или јединице времена, односно повећава продуктивност рада.

Постоји велики број производних или технолошких поступака код којих је могуће применити *CAPP/CAM* системе. У пракси, то су они произ-

водни и технолошки поступци када добици остварени применом ових система знатно премашују улагања у набавку и инсталацију (покретање) CAPP/CAM апликација. Рачунарски потпомогнута производња може се потврдити у реалном животу како на најједноставнијем, тако и на најсложенијем примеру. То значи да примену рачунарске апликације можемо видети и приликом припреме топлих напитака (кафе-аутомати), али и приликом планирања и моделирања, спровођења и контролисања производње електричне енергије у нуклеарној електрани. У великом броју случајева у пракси, CAPP и CAM апликације су специјализоване, односно, посебно намењене одређеној класи исто-врских технолошких процеса. Ова врста CAPP/CAM апликација се често називају и системи (софтвер) за контролу процеса – *Process Control Systems*. У таквим врстама CAPP/CAM апликација корисник има мало простора да значајно (садржајно и детаљно) измени технолошки поступак. Остављено му је да бира унапред предвиђене опције - подешавање истоветног производног поступка или бирање варијанте читавог једног истог поступка обраде. Пример CAPP/CAM апликације која допушта промену опција ради подешавања истог поступка може бити CAPP/CAM апликација намењена за старење и отпуштање алуминијумских одливака при чему се, подешавањем вредности температуре и трајањем појединих фаза термичких оптерећења у пећи, рачунаром планира (прописује) и контролише спровођење поступак старења и отпуштања заосталих напона у одливцима (Слика 2-1).



**Слика 2-1** Пећ за жарење алуминијумских одливака - трупаца (Alu Holding, Ниш).

Пример CAPP/CAM апликације која, поред тога што допушта промену појединих опција ради подешавања поступка обраде, омогућава избор унапред припремљених варијанти исте врсте технолошког поступка може представљати апликација намењена за контролу процеса

електро-хемијске обраде површина алуминијумских профила добијених истосмерним истискивањем (алу-профили за рамове прозорских окана). У једној варијанти технолошког поступка, шарже са алуминијумским профилима пролазе кроз један скуп када (судова) у којима се налазе одговарајући активни хемијски раствори, а у другој, пролазе кроз други скуп када (Слика 2-2). У том примеру, *CAPP/CAM* апликацијом се управља унутрашњим транспортом погона који носи и зарања шарже са алу-профилима у одговарајући скуп када (са одговарајућим растворима у њима), али се, такође, контролишу и остали параметри процеса, као што су вредности електричног напона и струје и концентрација активних хемијских супстанци у растворима. Примењујући једну, другу или  $n$ -ту варијанту поступка, добијају се алуминијумски профили другачијих механичких, хемијских и естетских одлика а, самим тим, и другачије намене.



Слика 2-2 Погон површинске заштите (Alu Holding, Ниш).

Поред специјализованих *CAPP/CAM* апликација, превасходно намењених моделирању и контроли спровођења тзв. *ограничено-* или *ретко-променљивих истоврсних* технолошких поступака и процеса (*Process Control Systems*), постоји други скуп *CAPP/CAM* апликација које су намењене за моделирање и спровођење технолошких поступака код којих је потребно знатно више интервенције у погледу утврђивања садржаја и детаља технолошког поступка. Овакве технолошке поступке могли бисмо да назовемо „*често-променљиви истоврсни*” или само *променљиви истоврсни* технолошки поступци. Такви *CAPP/CAM* системи најчешће се примењују за планирање и моделирање операција машинске обраде и контролу њиховог спровођења. Велика различитост геометрије и материјала делова за чију се израду препоручује машинска обрада захтева исто тако велику различитост технолошких поступака исте врсте. На пример, глодање зупчаника и глодање сегмента калупа за израду делова бризгањем полимера су истоврсне операције машинске обраде, али се те

операције обављају другачијим алатима, користи се другачији стезни алат, другачији су параметри резања, другачије су путање алата и често се обрада изводи на различитим машинама (нпр. глодање зупчаника треба да се обавља на посебним врстама глодалица посебно конструисаних и грађених за те операције обраде). Дакле, приликом прописивања, односно моделирања технолошког поступка обраде оваквих делова потребно је да се за сваки део посебно разраде детаљи операција и захвати обраде. Врсте обрада које су најчешће „покривене” овом класом *CAPP/CAM* апликација су наведене у листи:

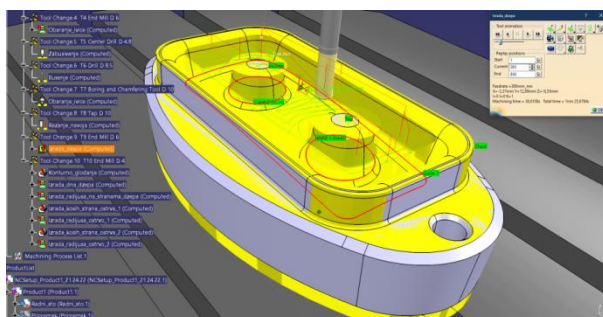
1. обрада резањем
  - а) стругање,
  - б) глодање,
  - в) бушење,
  - г) брушење,
2. обрада пластичним деформисањем:
  - а) топло и хладно ковање,
  - б) топло ваљање,
  - в) истискивање,
  - г) дубоко извлачење,
  - д) савијање и профилисање,
3. обрада неконвенционалним методама:
  - а) електро-ерозионо сечење жицом<sup>1</sup>,
  - б) сечење ласером,
  - в) сечење воденим (абразивним) млазом,
  - г) сечење јонизованим гасом (плазмом),
  - д) уклањање материјала ултразвуком,
4. израда делова адитивним технологијама, додавањем материјала у слојевима;
5. ливење у калупу под притиском (тзв. бризгање полимерних материјала и лаких метала),
6. обраде спајањем:
  - а) заваривање и
  - б) лепљење,
7. бојење (наношење пигмента),
8. склапање (монтажа).

У стручном тексту или говору, акроним *CAPP/CAM* најчешће се односи управо на класу *CAPP/CAM* рачунарских програмских апликација

---

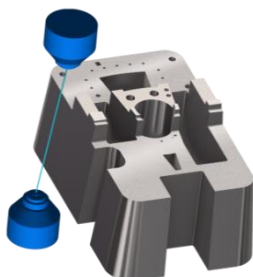
<sup>1</sup> У стручној литератури одговарајући акроним на енглеском је *wire-EDM*.

помоћу којих се моделирају све претходно наведене **конвенционалне обраде резањем** (Слика 2-3). Обично, ова класа *CAPP/CAM* апликација у себи садржи посебне модуле (делове апликације) намењене за поједине врсте машинске обраде резањем. Најчешће се користи модул за глодање и модул за стругање. Операције израде отвора и рупа (бушење, проширивање, упуштање, развртање, урезивање навоја и др.) обично су укључене у модуле за глодање и стругање. Такође, код већине *CAPP/CAM* апликација из ове класе, могу се наћи и модули намењени моделирању електро-ерозионим сечењем жицом (Слика 2-4).

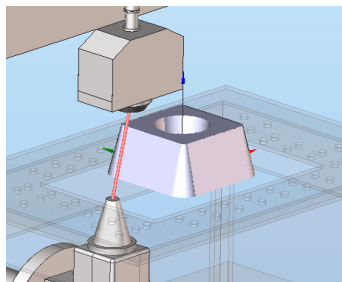


Слика 2-3 Пример приказа путање глодала и симулације кретања (алата/радног стола) у *CAM* модулу Catia V5 PLM софтвера.

**Неконвенционалне методе обраде**, које су наведене, најчешће се моделирају помоћу посебних *CAM* модула у оквиру постојећих *CAPP/CAM* апликација за конвенционалне обраде резањем. Оно што је карактеристично за ове апликације је да је путања „алата“ најчешће дводимензионална (2D) контура. Код електро-ерозионог сечења жицом под нагибом користе се две 2D контуре за вођење једног и другог краја жице (Слика 2-4).



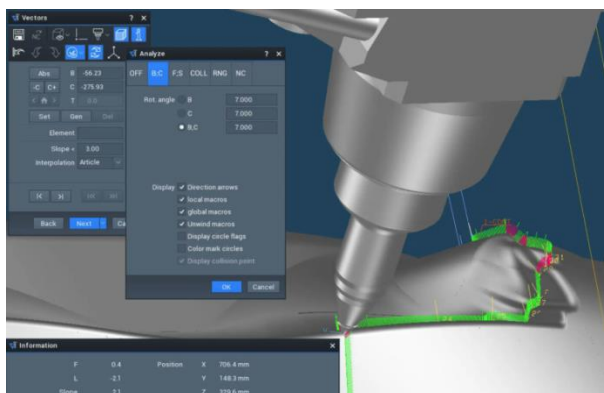
а)



б)

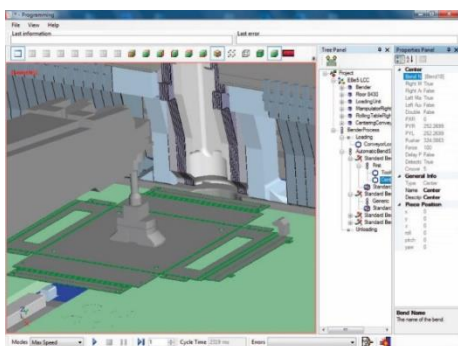
Слика 2-4 Приказ симулације тзв. 4-осног електро-ерозионог сечења жицом користећи 2 путање у две (XY) равни помоћу две различите *CAM* апликације а) Master *CAM* и б) Sprut *CAM*.

Наравно, постоје и сечења која се обављају по тродимензионалним (3D) контурама и тада је примена *CAM* модула неопходна за моделирање оптималне путање и оријентације осе сечења (нпр. ласерског зрака) у погледу ефикасности и безбедности (Слика 2-5).



Слика 2-5 Приказ секвенце у процесу моделирања кретања и подешавања оријентације ласерске главе при том кретању (Tebis² *CAM* апликација).

Код **операција обраде пластичним деформисањем** најчешће постоји потреба за моделирањем технолошког поступка савијања металних лимова ради формирања разноликих металних кућишта и кутија. *CAM* апликација из ове класе нема много на тржишту и углавном се испоручују са машином за савијање панела и формирање кутија. На слици (Слика 2-6) је приказан један од малобројних софтвера за моделирање читавог поступка савијања металних панела (претходно пред-обрађених припремака од лима).



а)



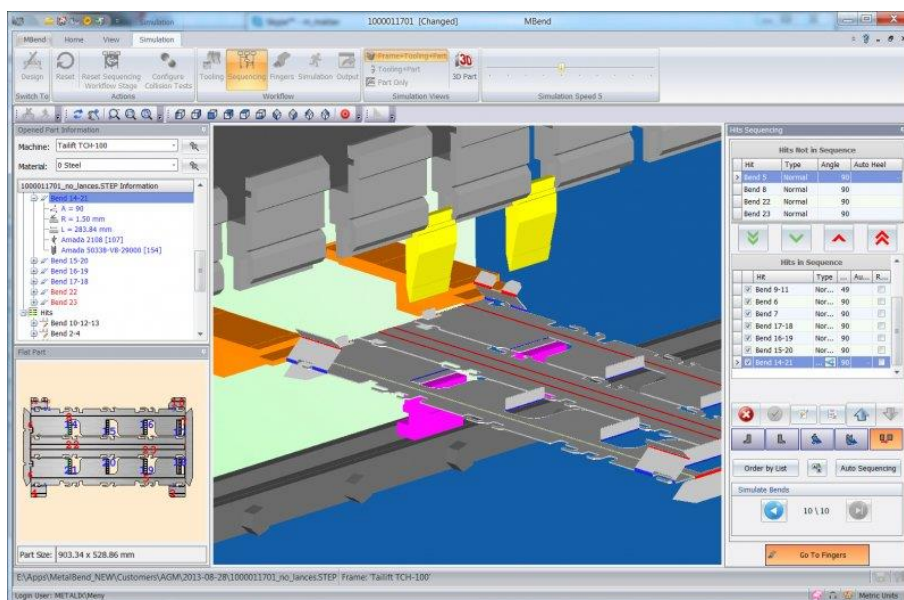
б)

Слика 2-6 *CAM* софтвер намењен планирању и симулацији операција савијања лимених припремака у кутије/кућишта (Master Bend *CAM* , IMTS³).

<sup>2</sup> <https://www.tebis.com/en/software/cam-software/3d-laser-cutting>



Треба поменути и *CAM* апликације за моделирање савијања које се обавља на универзалним машинама за савијање. Планирање геометрије алата, распоред захвата и планирање позиција припремка у захвату су главне функције ових апликација. Ова класа *CAM* апликација пружа могућност симулације самог процеса (Слика 2-7), затим израде извршног кода за управљачке јединице машина и израде технолошких карти (листа операција).

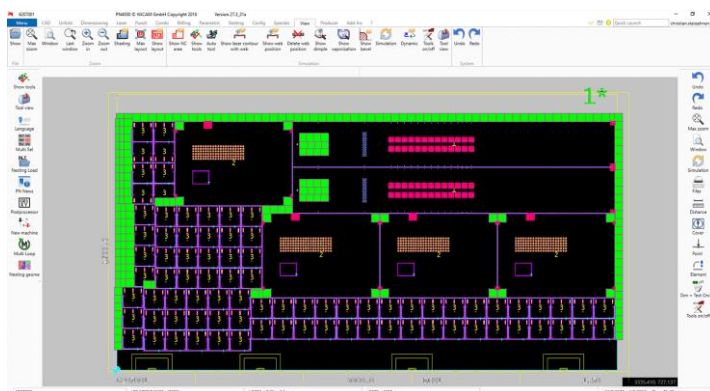


Слика 2-7 Приказ секвенце у симулацији технолошког поступка савијања лима (MBend *CAM* апликација, Metalix<sup>4</sup>).

Такође, честа примена *CAM* апликација за операције обраде деформисањем среће се код моделирања операција пробијања и просецања из табли лима (Слика 2-8). Најважније функције ових апликација су намењене планирању оптималног распореда контура на припремку како би се добио минимални отпад материјала, затим планирању редоследа извршавања захвата, распореда алата у носачу и прорачуну силе пробијања/просецања (предупредити превазилажење дозвољене силе). Такође, ту је и део функционалности који се односи на израду извршног кода којим се непосредно програмира рад машине, односно кретање радног стола, односно држача припремка (лима).

<sup>3</sup> <https://imts.com.au/software/master-bendcam/>

<sup>4</sup> <https://www.metalix.net/product/mbend/>



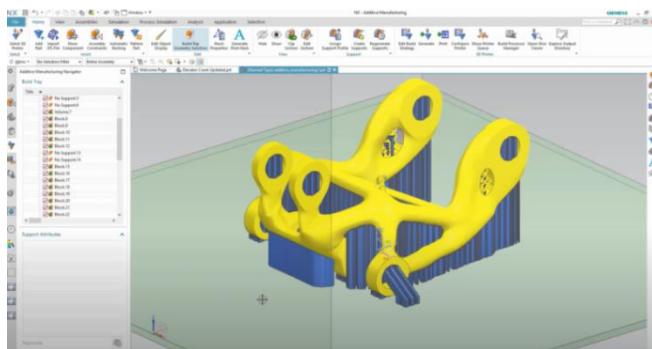
Слика 2-8 Приказ корака у моделирању распореда алата помоћу CAM апликације за планирање операција пробијања и просецања (Wi CAM <sup>5</sup>).

Све присутнија израда делова применом неке од **адитивних технологија** такође захтева интензивну припрему и, касније, контролу спровођења поступка додавања материјала у слојевима. Већина произвођача машина за израду делова додавањем материјала (у свакодневном изражавању, најчешће се користи одредница *3D штамп*) са машином испоручује и рачунар за управљање машином са инсталираним посебним CAPP/CAM софтвером којим се омогућава кориснику да детаљно испланира оријентацију дела(ова) у комори. Такође, овај софтвер омогућава планирање путање извршног елемента који врши очвршћавање или наношење материјала те самим тим омогућава и планирање унутрашње структуре дела. Ова класа CAPP/CAM апликација омогућава да корисник изабере унапред дефинисане опције у погледу технолошких параметара као што су брзина кретања радног стола, брзина наношења материјала, температура у комори, температура радног стола и материјала и др. Поред специјализованих CAPP/CAM апликација које се испоручују већ инсталиране на рачунару за контролу рада машине за израду делова додавањем материјала, савремена интегрисана PLM<sup>6</sup> решења за *управљање животним веком производа* попут PTC Creo-Parametric, Dassault Systems Catia, SolidWorks, 3DEXperience, Fusion 360 -AutoDesk, NX - Siemens, у својим CAPP/CAM модулима имају „под-модуле“ који су посебно

<sup>5</sup> <https://www.wicam.com/en/cadcam-nesting-software/>

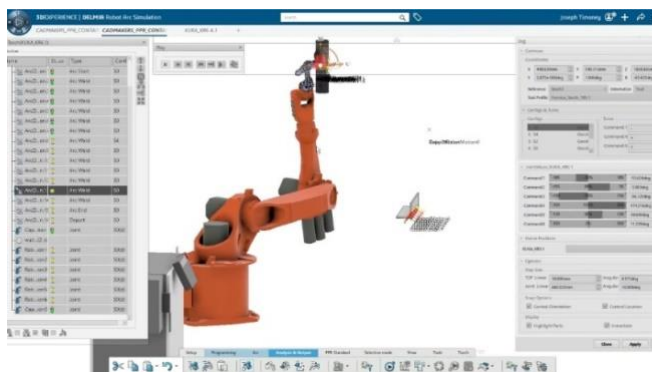
<sup>6</sup> Product Lifecycle Management – акроним из енглеског језика који означава тзв. систем интегрисаних рачунарских програмских апликација које треба да омогуће рачунаром потпомогнуто „управљање производом у његовом животном веку“, односно, да све активности које су повезане са одређеним производом, од идеје и развоја, преко производње, мерења и контроле, па све до праћења његове експлоатације, а потом и рециклаже, буду подржане и аутоматизоване тим системом рачунарских апликација.

намењени за моделирање и контролу спровођења поступака израде делова адитивним технологијама (Слика 2-9).



**Слика 2-9** Приказ корака у подешавању геометрије тзв. носеће структуре помоћу *CAM* модула намењеног изради делова адитивним технологијама наношењем материјала у слојевима (Additive Manufacturing *CAM* модул NX PLM, Siemens<sup>7</sup>).

**Моделирање операција спајања, бојења и склапања** се обавља посебним *CAPP/CAM* апликацијама помоћу којих инжењер, највећим делом, моделира а потом и *програмира* покрете „манипулатора“ или тзв. роботске руке (Слика 2-10). Ова класа *CAPP/CAM* апликација се може наћи у интегрисаним *PLM* решењима у виду посебних под-модула њихових *CAPP/CAM* модула, али се могу наћи и као посебне апликације које су развијене за одређену врсту робота (роботских руку).

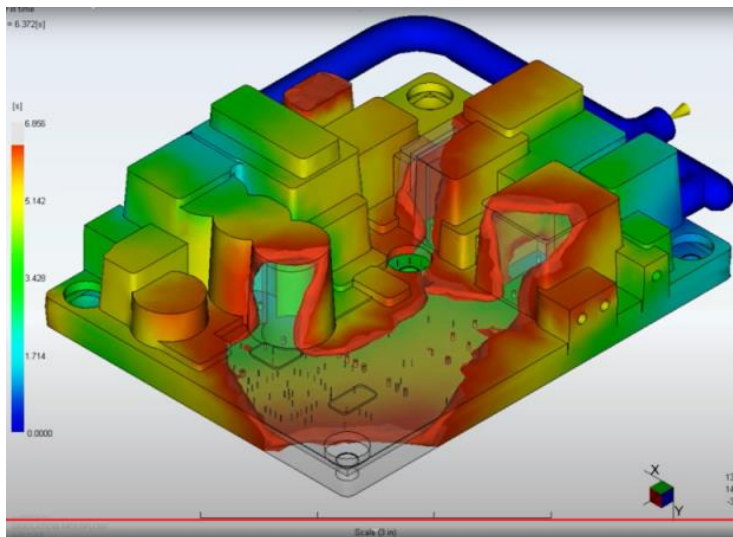


**Слика 2-10** Приказ секвенце моделирања путање роботске руке којом се обавља операција заваривања помоћу *CAM* модула 3DExperience PLM софтвера - Delmia<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Презентацију је припремио [GMSystem](http://www.gmsystem.com) и може се наћи на: (<https://www.youtube.com/watch?v=T1UYHtrTWug>)

<sup>8</sup> Презентација се може наћи на: <https://www.youtube.com/watch?v=E9RVzLfw4SU>

**Моделирање ливења у калупу под притиском** се обавља посебном класом *CAM* апликације која се може сврстати и у *CAE* програмске апликације с обзиром да се доминантно користи за спрегнуту анализу и симулацију динамике флуида и термодинамичких ефеката технолошког поступка уливања растопљеног материјала у калупну шупљину (Слика 2-11).



**Слика 2-11** Приказ симулације уливања растопљеног материјала у калупну шупљину помоћу *CAE/CAM* програмске апликације (Mold Flow Advisor, Autodesk<sup>9</sup>).

Управо то чини ову врсту знатно другачијом у односу на остале *CAPP/CAM* апликације намењене некој врсти машинске обраде. Дакле, ако би смо инсистирали на што тачнијој класификацији ових апликација, онда је треба сврстати у класу *CAE/CAM* рачунарских програмских апликација.

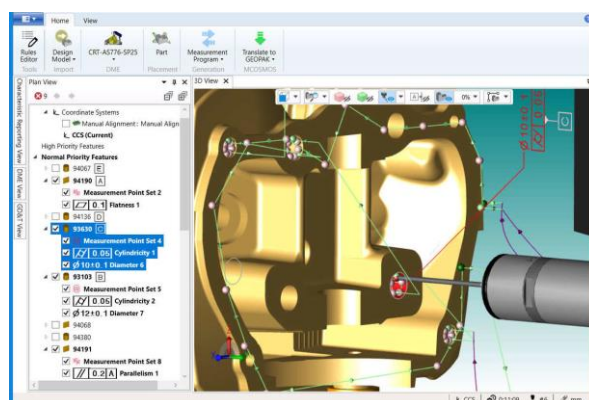
Тренутно је присутан тренд израде хибридних машина алатки које на себи, поред конвенционалних резних алата и носача алата, имају додатне извршне елементе (бризгаљке) којима се врши nanoшење материјала (полимера и метала) у слојевима (Слика 2-12). Постоји само пар *CAPP/CAM* апликација које пружају могућност моделирања процеса уклањања и додавања материјала на хибридним машинама алаткама. На индустријским рачунарима за управљање тим машинама, тзв. *управљачким јединицама* се инсталирају *CAM* програмске апликације које су створене посебно за ту врсту машине и ту врсту примене.

<sup>9</sup> Презентација се може наћи на: <https://www.youtube.com/watch?v=zFp5pqEgSI0>



Слика 2-12 DMG Mori Lasertec 125 3D је пример хибридне машине алатке која може да обавља операције 5-осног глодања и додавање материјала по слојевима<sup>10</sup>.

Поред претходно наведених процеса обраде и склапања, *CAPP/CAM* апликације се користе и за моделирање и контролу спровођења операција мерења и контроле геометријских и димензионих одступања. Савремене нумерички-управљане машине намењене мерењу геометрије израђених делова (тзв. СММ<sup>11</sup> машине или системи) захтевају да се процес мерења и контроле детаљно испланира и пропише, односно „измоделира“. Касније, извршни програмски код добијен на основу тог модела управља извршним елементима машине који носе мерне сонде или изворе електромагнетног зрачења и даваче (сензоре) бележећи координате жељеног скупа тачака. Такве апликације се најчешће налазе уграђене у постојеће *CAPP/CAM* системе неког PLM решења или као самосталне, посебне, рачунарске програмске апликације инсталиране на рачунару који управља СММ системом (Слика 2-13).



Слика 2-13 Приказ моделирања захвата „скенирања“ геометријских и димензионих одступања изабраних геометријских места и рупа на кућишту (MiCAT Planner, Mitutoyo<sup>12</sup>).

<sup>10</sup> Презентација се може наћи на: (<https://www.youtube.com/watch?v=ruTo9hIYQGw> )

<sup>11</sup> Coordinate Measuring Machine

<sup>12</sup> Презентација се може наћи на: ([https://www.youtube.com/watch?v=mPa-OsFyJII&feature=emb\\_rel\\_pause](https://www.youtube.com/watch?v=mPa-OsFyJII&feature=emb_rel_pause) )



### 2.1.1 Разлика између CAPP и CAM апликација

Пре него што се настави са излагањем о додатним разврставањем и начину примене CAPP/CAM апликација, потребно је објаснити разлику између CAPP и CAM апликација. Та разлика се, пре свега, огледа у примени и опсегу опција CAPP и CAM апликација. CAPP апликације су намењене превасходно фази *технолошке припреме* производног процеса, док су CAM апликације користе не само у технолошкој припреми већ и касније, у процесу контроле и надзора спровођења претходно испланираног и прописаног, и измоделираног технолошког поступка (Слика 2-14).



Слика 2-14 Место примене CAPP, CAM и Production Planning and Scheduling апликација.

Подсећања ради, *технолошка припрема* је одредница којом се, најчешће, означавају све оне активности којима се обезбеђује технолошка спремност производне организације да отпочне и спроведе производњу одређеног производа у одређеном року са што мањим трошковима обезбеђујући, при томе, циљани квалитет и број производа. Технолошка припрема најчешће обухвата следеће активности:

1. анализу технологичности (израдљивости) производа;
2. анализу применљивости постојећих или расположивих технолошких поступака;
3. прописивање технолошких поступака обраде и монтаже;
4. избор и/или пројектовање потребне технолошке опреме;
5. избор и/или пројектовање алата и помоћног прибора потребног за спровођење процеса производње;
6. израда временског плана спровођења прописаних технолошких поступака и ангажовања ресурса технолошког система;
7. набавка изабране опреме и потребног репроматеријала и енергије;
8. спрежање чланова и учесника технолошког система у систем спреман за отпочињање и спровођење производње.

Циљ технолошке припреме је управо унапређење кључних показатеља учинка технолошког система (види страницу 2-15), а превасходно увећање продуктивности и квалитета.

*CAM* апликације су опремљене већим бројем опција или софтверских алата којима се детаљно дефинишу одлике технолошких поступака обраде и монтаже. На пример, у *CAPP* апликацијама које су намењене планирању технолошких поступака конвенционалне машинске обраде резањем, обично нема предвиђених опција које дефинишу одлике путање резног алата, нити су на располагању опције којима се утврђује геометрија резног алата и/или параметри резања (помака, брзине и дубине резања). Додатно, *CAM* у односу на *CAPP* апликације, одликује постојање скупа софтверских алата којима се, најпре, симулира, а затим анализира моделирани технолошки поступак, и коначно, генерише извршни код који контролише рад нумерички управљаних машина и алата приликом спровођења технолошког поступка обраде. Дакле, може се рећи да су *CAPP* апликације намењене за моделирање технолошких поступака обраде и монтаже до нивоа *захвата обраде*, али на апстрактнијем нивоу, где се одређује врста и редослед операција и захвата технолошког поступка. Софтверски алати *CAM* апликација служе, пак, да се одлике тих технолошких операција и захвата детаљно разраде. У реалној пракси, савремене комерцијално доступне *CAPP/CAM* апликације су, заправо, јединствене рачунарске програмске апликације у које се убацује што више софтверских алата како би се функционалност тих апликација учинила већом и тиме придобило тржиште корисника.

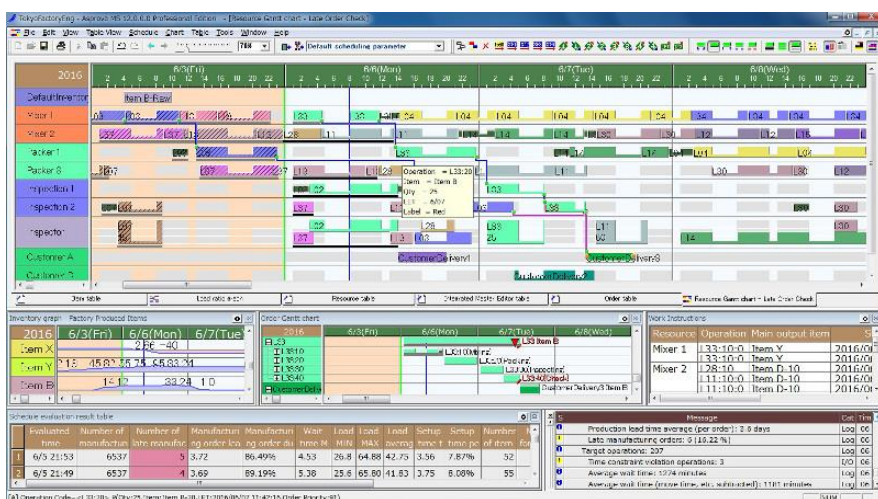
Посебна врста савремених *CAPP* апликација су искључиво намењене планирању времена спровођења технолошких поступака као и ангажовања производних средстава, затим планирању оптерећења ресурса технолошког система (људи, машина, алата, потрошног материјала и др.). Та врста *CAPP* апликација се често назива и софтвером за планирање производње (једна од енглеских одредница за ову врсту софтвера је *Production Planning and Scheduling, PPS*). *PPS* апликације могу бити самосталне попут *Asprova*<sup>13</sup> (Слика 2-15) или интегрисане у неки сложенији *PLM* систем попут *Ortems*<sup>14</sup> који је део *Delmia Dassault Systems PLM* решења (Слика 2-16). Понекад, *PPS* апликације се могу уградити у још сложеније рачунарске програмске апликације, тзв. *ERP* системе које служе свеобухватном планирању ресурса предузећа (попут *SAP*-ових *ERP* решења). *PPS* апликација се не користи за детаљну разраду технолошког поступка, односно моделирање одлика технолошких операција и захвата. Међутим, треба знати и то да *PPS* апликације служе не само за плани-

---

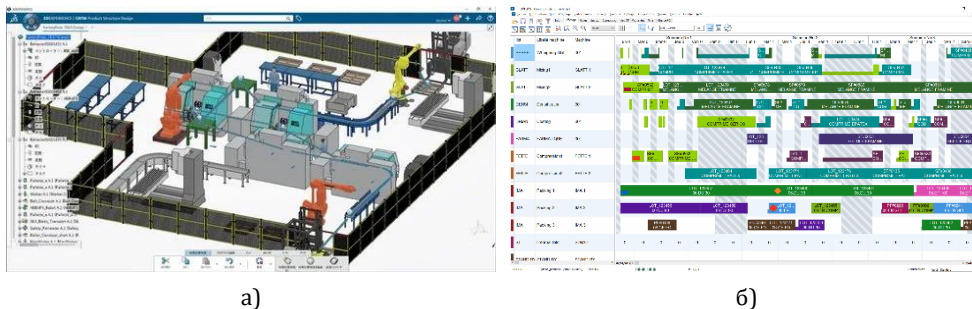
<sup>13</sup> *Asprova* (<https://www.asprova.eu>, <https://www.asprova.eu/en/production-planning-scheduling-software/aps-system/functions-asprova-aps/>)

<sup>14</sup> *Ortems Delmia* (<https://www.3ds.com/products-services/delmia/products/delmia-ortems/>)

рање и моделирање производних процеса, већ и за детаљно праћење одвијања процеса производње у реалном времену и оптерећења, односно заузетosti производних ресурса и свих чланова технолошког система.



Слика 2-15 Приказ окружења Asprova CAPP апликације која је намењена планирању производње тзв. *Production Planning and Scheduling (PPS)*.



Слика 2-16 Приказ (а) окружења за разраду просторног распореда опреме технолошког система у Delmia 3DExperience као дела процеса планирања производње и (б) окружења Delmia Ortems за планирање временског редоследа спровођења технолошких операција (Dassault Systems).

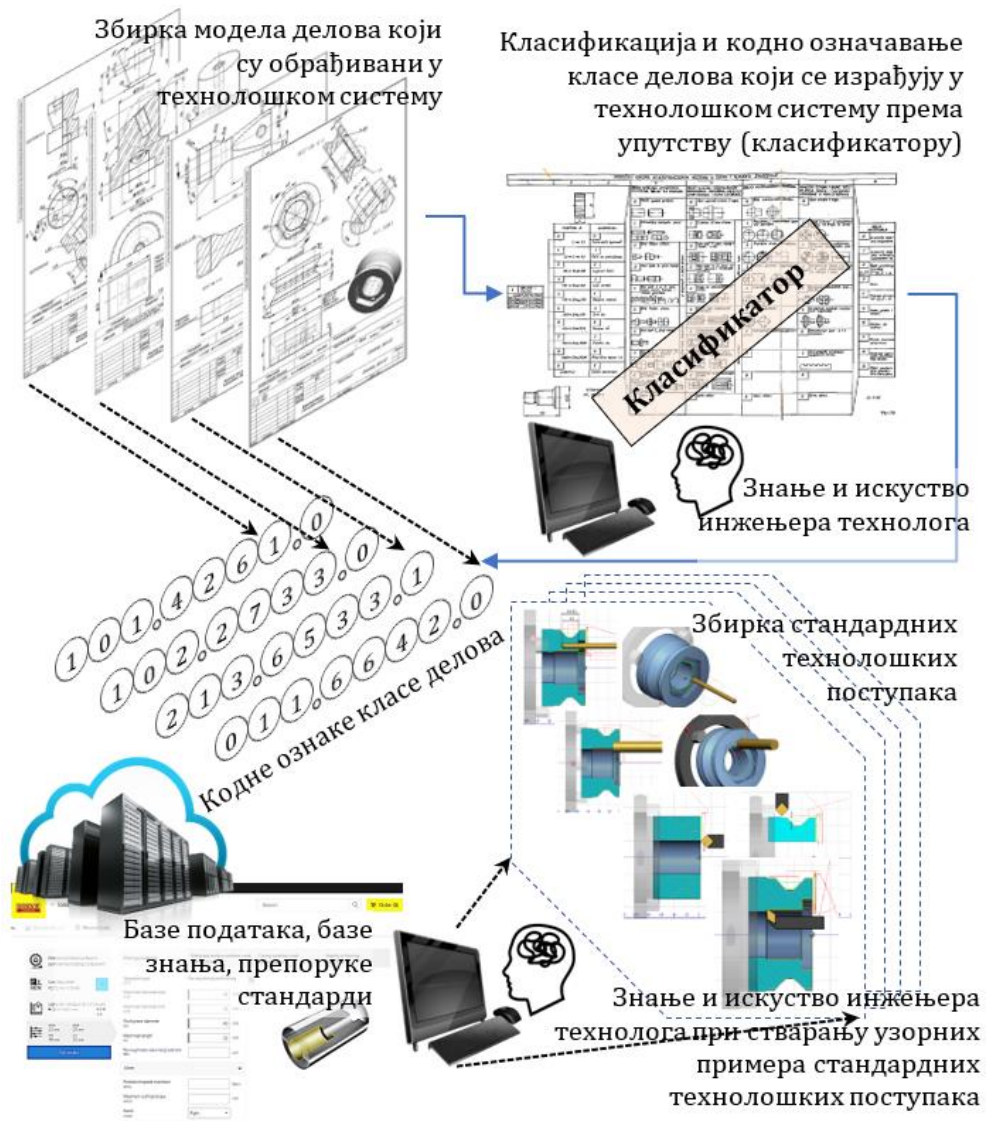
### 2.1.2 ВАРИЈАНТНИ, ГЕНЕРАТИВНИ И ХИБРИДНИ CAPP СИСТЕМИ

Разврставање CAPP апликација на *варијантне*, *генеративне* и *хибридне* потиче из времена када су се CAPP и CAM апликације појавиле на тржишту седамдесетих година 20. века. Основна одлика варијантног приступа моделирању технолошког поступка огледа се у коришћењу претходно припремљених узорних примера (стандардних) технолошких



поступка уз одговарајуће, потребне измене за тренутни случај. Овај приступ је заснован на тези да се у пракси, у одређеном технолошком систему (радионици, погону) који је увек изграђен са јасно утврђеном наменом, која је ограничена на коначан скуп технолошких поступака и операција (нпр. погон израде алата за истосмерно истискивање алуминијумских профила који се користе у формирању архитектурних елемената попут прозора, врата и сл.) може изградити дигитална збирка, односно база података узорних примера стандардних технолошких поступака и операција (са мање или више детаља) који би се могли брзо искомбиновати (склопити) у потребну *варијанту* технолошког поступка који захтева тренутно разматрани део (Слика 2-17 и Слика 2-18). Уз то, за поједине детаље стандардних технолошких поступака и операција за које се очекује да треба мењати при формирању сваке варијанте технолошког поступка и операције за израду тренутно разматраног дела, могуће је предвидети могућност интервенције ради промене детаља одлика обраде.

Да би се могао применити варијантни приступ моделирања технолошких поступака, потребно је најпре припремити *CAPP* систем. Припрема *CAPP* система подразумева стварање збирке стандардних технолошких поступака и операција потребних за обраду ограниченог скупа узорних примера класе делова који се обрађују у датом технолошком систему. Такође, у *фази припреме*, *CAPP* систем се повезује или опрема системом за класификацију (класификатором), базама података, стандардима и препорукама које се користе у другој фази када се моделира технолошки поступак за тренутно разматрани стварни део. У *фази примене*, врши се најпре класификација тренутно разматраног дела, а потом се претражује збирка узорних примера делова у потрази за деловима сличних технолошки-релевантних геометријских и функционалних одлика. Следећи корак који *CAPP* апликација треба да обави је да из збирке стандардних технолошких поступака за те препознате сличне делове извуче и препоручи најприкладније стандардне технолошке поступке. Корисник, инжењер-технолог, својим знањем и искуством врши коначан избор стандардног технолошког поступка и, ако то случај захтева, врши измене тог поступка и прилагођава га потребама обраде за тренутно разматрани део. Коначно, када инжењер формира нови технолошки поступак за дати део који је варијанта одређеног стандардног поступка, врши се стварање пропратне документације, чување тог технолошког поступка у базу како би се могао искористити за неки следећи део.



**Слика 2-17** Приказ „фазе припреме” варијантног CAPP система, односно стварање збирке узорних примера стандардних технолошких поступака за дати технолошки систем.



**Слика 2-18** Приказ „фазе примене” варијантног CAPP система, односно моделирања технолошког поступка за стварни део на основу узорних примера стандардних технолошких поступака.

CAPP систем који примењује варијантни приступ моделирања технолошког поступка заснива се на:

1. Реалном сагледавању степена разноликости технолошких поступака и операција које се јављају у одређеном технолошком систему који, скоро по правилу, није претерано велики, односно постоји коначан број стандардних поступака који се могу применити с обзиром на технолошке ресурсе система.

## 2. Примени рачунара за

- брзо и прецизно претраживање дигиталних збирки (база) унапред припремљених стандардних технолошких поступака и њихових варијанти насталих током претходног коришћења;
- брзу и једноставну измену појединих детаља стандардних технолошких поступака њихових варијанти;
- брзу израду документације (плана обраде);
- брзо чување ново-створених варијанти технолошких поступака и операција у збирци или бази узорних примера технолошких поступака.

### 2.1.2.1 Изазови примене варијантног приступа

Приликом претраживања збирки (база) унапред припремљених стандардних технолошких поступака и њихових варијанти највећи изазов за садашње CAPP/CAM системе је *препознавање сличности* између технолошки-релевантних геометријских и функционалних одлика дела који се тренутно разматра, за који треба прописати нови (нову варијанту) поступак обраде, и тих истих одлика оних делова за које, у збирци стандардних технолошких поступака и њихових варијанти, већ постоје варијантна решења. Уобичајени приступ у савладавању ове тешкоће ослања се на *разврставање* или *класификацију* делова на *фамилије* или *тип* делова који имају сличне технолошки-релевантне геометријске и функционалне одлике. Свака фамилија или тип се кодира, односно представља одговарајућом комбинацијом бројева или алфа-нумеричких симбола, као и помоћу BAR или QR кодова и тако омогућава рачунарској програмској апликацији тренутно препознавање одговарајућег типа делова. Разврставање, а затим и кодирање се може обављати:

1. ангажовањем инжењера са одговарајућим знањем или
2. аутоматски, применом рачунарске апликације која је оспособљена за
  - а) препознавање сличности између технолошки релевантних геометријских и функционалних одлика делова и
  - б) његову класификацију у унапред припремљене фамилије технолошки сличних делова према одговарајућем поступку или схеми (класификатору).

Овакве рачунарске програмске апликације скоро обавезно ангажују неке од метода вештачке интелигенције (нпр. одговарајући експертни систем, или машинско учење или сл.) јер није могуће унапред предвидети све варијанте делова које се у реалној пракси могу јавити.

Следећи и знатно сложенији изазов је у вези са изменом постојећег стандардног технолошког поступка или неке од његових, већ постојећих, варијанти тако да новостворени технолошки поступак буде целисходан. Ову активност тренутно обавља инжењер на основу свог знања и искуства. У суштини, успешно обављање ове активности захтева неку врсту креативности и, за сада, то остаје „изван домета” постојећих рачунарских програмских апликација.

Предности варијантног приступа у моделирању технолошких поступака су:

1. једном створен узорни пример стандардног технолошког поступка може да се користи за све *варијанте* делова сличних технолошки релевантних геометријских и функционалних одлика;
2. релативно је једноставан за увођење у употребу и каснију примену (релативно је лако обучити инжењере за његово коришћење);
3. инжењер – технолог има пресудан утицај на измене и стварање нове варијанте технолошког поступка (лако је пратити и разумети одлуке које су донесене у вези са изменама стандардног технолошког поступка);
4. веома су повољни за примену код технолошких система у којима је већ усвојена доктрина типске и групне технологије.

Недостаци варијантног приступа огледају се у:

1. ограничености примене за делове који су слични деловима за које је формирана збирка узорних примера стандардних технолошких поступака;
2. потреби за инжењерима-технолозима са великим знањем и искуством за измене стандардних поступака обраде и њихово прилагођавање тренутно разматраном случају;
3. детаљност узорних примера стандардних технолошких поступака је обично ниска;
4. немогућности једноставне примене код високо аутоматизованих и флексибилних технолошких система, који се одликују великом заступљеношћу НУ (CNC) машина, без великих интервенција инжењера-технолога.

Код тзв. *генеративног* приступа моделирања технолошког поступка постојала су (и још постоје) знатно већа очекивања од рачунарске програмске апликације која би подржавала тај концепт: *CAPP* апликација са генеративним приступом треба да самостално, без помоћи инжењера

(технолога), препозна све технолошки релевантне геометријске и функционалне одлике дела који треба обрадити ишчитавајући дигитални модел (машинског) дела који је претходно изграђен у CAD апликацији<sup>15</sup> и, потом, створи и предложи целисходан технолошки поступак за израду дела (Слика 2-19).



**Слика 2-19** Приказ рада CAPP система који користи тзв. генеративни приступ.

Од CAPP апликације са тзв. *генеративним приступом* се, дакле, очекује да она обави анализу CAD модела што заправо значи да:

1. ишчита или, још амбициозније, препозна техничке градивне елементе CAD модела (тзв. feature-a), потом
2. значењски категоризује геометријске, функционалне и технолошке одлике креираног дела ког репрезентује CAD модел, (нпр. категоризује све површине дела у погледу врсте обраде коју треба применити ...) и

<sup>15</sup> „Дигитални модел машинског дела израђен у CAD апликацији” је израз који је намерно овде употребљен јер, пре свега, садржи опис његове геометрије, као и низ информација које се односе на начин обраде и израде дела, попут информације о материјалу, толеранцијама облика и мера, квалитету површина и др.

3. пропише технолошки поступак са свим операцијама и захватима и њиховим редоследом и одликама (нпр. обрадна геометрија, алат, путања алата, режими обраде и др.).

Време је показало да је овакво очекивање било превелико, јер осим концептуалних решења која су била намењена посебним типовима делова, до скоро није било много апликација са генеративним приступом које су заиста заживеле у реалној пракси. Већина произвођача *CAPP/CAM* софтвера, још на самим почецима развоја ових програмских апликација, определила се да покуша да имплементирају тзв. *семи-* или *полу-генеративни* или тзв. *хибридни* приступ моделирања технолошких поступака јер је то било лакше остварити, а истовремено се корисницима *CAPP/CAM* апликације са хибридным приступом нудила могућност да неупоредиво повећају продуктивност и квалитет прописивања технолошких поступака у односу на конвенционални и варијантни приступ.

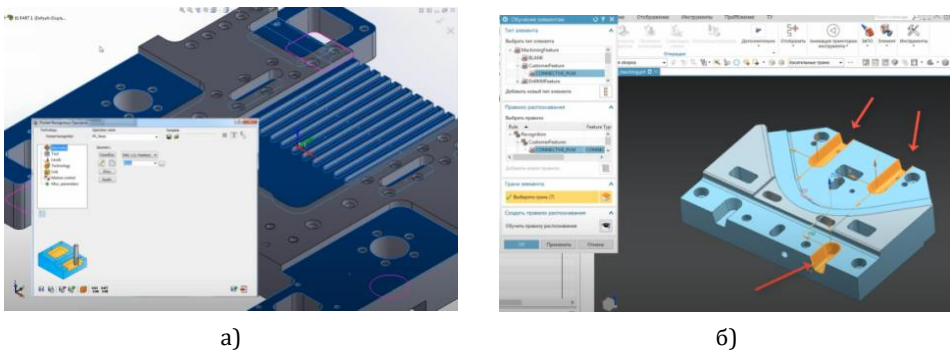
Када је *хибридни* приступ у питању, комбинују се поједини елементи генеративног и варијантног приступа. Заправо, у фази утврђивања технолошког поступка *на апстрактнијем нивоу* примењивао би се генеративни приступ. Алати *CAPP/CAM* рачунарских програмских апликација, најчешће, потпомогнути методама вештачке интелигенције, вршили би ишчитавање структуре *CAD* модела и успевали да препознају или издвоје (*feature recognition* и *feature extraction*) неке од уобичајених техничких градивних елемената *CAD* модела као и да обаве „технолошку” категоризацију појединих површина, односно, да за њих препоруче *иницијалне* или *полазне, прикладне операције обраде*<sup>16</sup>. Ради се о *feature recognition* и *feature extraction* алатима који успевају да на *CAD* моделу препознају отворе и рупе (*holes*) који „препоручују” захвате бушења, проширивања и др., затим удубљења (*pockets*) који препоручују запреминско глодање, ребра (*ribs*) која препоручују контурно глодање, на ротационим деловима обимне жљебове (*grooves*) који препоручују усецање, цилиндричне и конусне површине које препоручују спољашњу или унутрашњу уздужну стругарску обраду, заобљења (*fillets*) и оборене ивице (*chamfers*) које препоручују контурно стругање и др. Данас, код већине *CAPP/CAM* апликација, на тржишту доминантних *PLM* решења попут PTC – Creo, Dassault Systemes – Catia, SolidWorks и Solid CAM, Siemens PLM – NX, AutoDesk – Fusion360, али и код неких самосталних

---

<sup>16</sup> Иницијална или полазна прикладна операција обраде је заправо нешто налик стандардном технолошком поступку или операцији код варијантног приступа. Даља разрада детаља, односно подешавање свих одлика те операције се препушта кориснику, ако сматра да постоји бољи избор опција тих одлика.



CAPP/CAM апликација попут OpenMind и Master CAM постоје алати (и алгоритми) који врше препознавање појединих геометријских градивних елемената (*feature recognition* и *feature extraction*), као и „технолошку“ категоризацију појединих површина и потом предложи одговарајуће обраде (Слика 2-20). Ипак, за сада, то су, углавном, алати који самостално могу да „технолошки“ категоризују само поједине површине, не и целе делове, нити групе (комплексе) обрадних површина које су настале комбинацијом више геометријско-техничких градивних елемената (*feature-a*). Такође, актуелни алгоритми из арсенала генеративног приступа моделирања успевају да утврде целисходан редослед операција у технолошком поступку у једноставнијим случајевима.



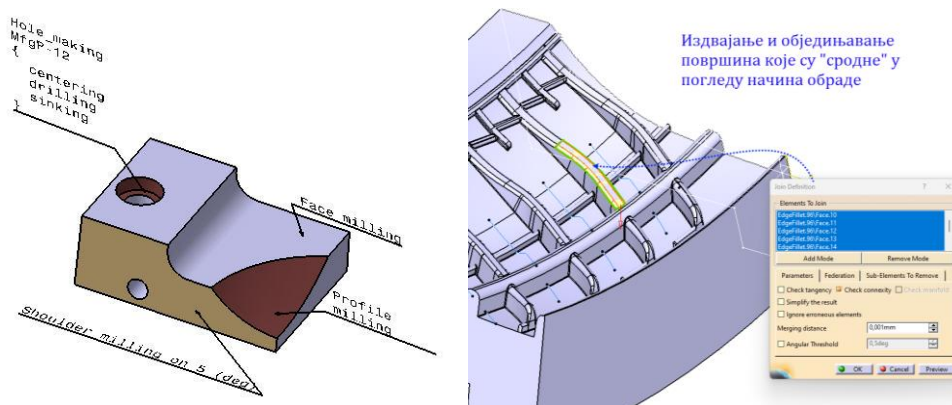
**Слика 2-20** Приказ секвенце када алгоритми CAM апликација врше препознавање појединих геометријских техничких елемената (тзв. отворених удубљења или „отворених џепова“), а потом и њихову категоризацију у погледу операције машинске обраде резањем која се може препоручити: а) Solid CAM iMachining<sup>17</sup> AF, б) NX CAM Feature Based Machining<sup>18</sup>.

Оно што је остало за сада ван арсенала ових CAPP/CAM апликација јесте алат који би, вероватно, применом неке од метода вештачке интелигенције, интелигентно, попут инжењера-технолога, могао да коригује препознате обрадне површине (*feature refinement*) на начин који ће препоручити целисходан технолошки поступак или операцију (Слика 2-21).

<sup>17</sup> Преузето са [https://www.youtube.com/watch?v=i8G\\_f4uweY8](https://www.youtube.com/watch?v=i8G_f4uweY8)

<sup>18</sup> Преузето са <https://www.youtube.com/watch?v=uKa0UrCzaT8>





**Слика 2-21** Препознавање и кориговање обрадних површина и њихова категорија према врсти захвата која се може применити.

Након што се заврши фаза генеративног приступа, наступа фаза варијантног приступа у коме се много детаљније врши разрада сваке поједине операције и захвата. Заправо, у фази примене генеративног приступа, алгоритми *CAPP/CAM* апликације врше „класификацију дела“, затим стварају и предлажу кориснику *уницијалне прикладне* операције и њихов редослед, али одмах затим, допуштају кориснику, да као у варијантном приступу, има могућност детаљног подешавања одлика сваке операције и захвата, као и њихов редослед и тако креира јединствену варијанту технолошког поступка. При томе, корисник савремене *CAPP/CAM* апликације има могућност да претражује базе података и базе знања, како локално на рачунару на коме се налази инсталиран и сам *CAPP/CAM* софтвер, тако и негде на рачунарској мрежи, било да се ради о ограничено доступном репозиторијуму на рачунарској мрежи предузећа, или на контролисано-отвореном *Cloud* сервису или *web*-платформи произвођача софтвера попут 3DEXperience платформе или произвођача алата и софтвера попут Sandvik Coromant - Master CAM платформе. У тим базама се могу наћи збирке варијанти уобичајених операција или захвата, а у неким и читавих технолошких поступака. Такође, у тим базама се налазе подаци о материјалима, стандардним алатима и прибору, препоруке и алгоритми за избор оптималних режима обраде (брзине резања, дубине резања и помака). Избором и подешавањем унапред дефинисаних варијанти операција и захвата и њиховим комбиновањем у редослед, који се кориснику чини најприкладнијим за обраду (израду) тренутно разматраног дела, корисник генерише јединствени технолошки поступак за дати део у потпуности. Кориснику је допуштено да формира своју збирку (базу) кориснички-дефинисаних варијанти технолошких поступака, операција и захвата које, касније, за обраду нових делова, може

поново користити као иницијалне варијанте које се, опет, могу мењати и подешавати. Једна од најбитнијих функционалности CAPP/CAM апликација са хибридним приступом јесте могућност рачунарске симулације моделираног технолошког поступка, операција и захвата. Тиме се кориснику, инжењеру-технологу, омогућава да визуелизује све детаље технолошког поступка, али и да егзактно утврди и провери да ли постоје грешке попут недозвољених кретања која могу оштетити део или машину и алате. Такође, симулацијом технолошког поступка, корисник је у прилици да процени неке од кључних показатеља учинка процеса обраде попут брзине уклањања запремине (код операција и захвата обраде резањем на пример) или тзв. главна и помоћна времена обраде. Коначно, корисник је у прилици да натера CAPP/CAM апликацију да оптимизује технолошки поступак спровођењем неколико узастопних понављања (итерација) измена појединих параметара у могућем опсегу вредности и симулација док се не постигну циљеви оптимизације.

Предности хибридног (генеративно-варијантног) приступа моделирању технолошког поступка су:

1. велика продуктивност у моделирању поступка обраде;
2. висок квалитет (ваљаност) моделираног поступка обраде;
3. детаљно моделирани поступак обраде што омогућава да се моделирани поступак брже проследи на спровођење, односно у производњу;
4. технолошки поступак се детаљно сагледава за сваки део независно од делова за које је већ, претходно, био моделиран технолошки поступак (ипак, као и код варијантног приступа, хибридни приступ омогућава кориснику да једном створени технолошки поступак, операција, захват може да се искористи као *полазни и прикладан* узорни пример за све варијанте будућих делова сличних технолошки релевантних геометријских и функционалних одлика);
5. релативно лако се прилагођава промени асортимана производње;
6. инжењер – технолог има утицај на измене и стварање нове варијанте технолошког поступка (лако је пратити и разумети одлуке које су донесене у вези са изменама стандардног технолошког поступка);
7. релативно једноставно их је применити код високо аутоматизованих и флексибилних технолошких система, који се одликују великом заступљеношћу НУ (CNC) машина и интензивном комуникацијом између самих машина у технолошком процесу

(што је типично за окружење тзв. *сајбер-физичких производних система* или *индустрије 4.0*);

Недостаци хибридног приступа су:

1. потреба за инжењерима-технолозима са великим знањем и искуством за измене стандардних поступака обраде и њиховим прилагођавањем тренутно разматраном случају (ипак, у односу на *CAPP/CAM* апликације са варијантним приступом, захтева мање интервенције);
2. неопходност спровођења обимне обуке инжењера, што га чини не тако једноставним за увођење у употребу и каснију примену;
3. потреба за већим инвестицијама у одређивању и уградњи логике моделирања технолошких поступака у алгоритме вештачке интелигенције који треба да обављају фазу рада *генеративног приступа*.
  - а) Потребно је да постоје стандардни формати записа одлика дигиталних модела дела, односно да улазне информације о деловима (*CAD* моделима) треба да буду јасно и прецизно дефинисане како би били „читљиви” за рачунарску програмску апликацију;
  - б) Потребно је изградити збирку (базу) знања и рачунарских алгоритама који треба да обезбеде интелигентно реаговање рачунарске програмске апликације. Заправо, потребно је да та база знања и алгоритми осигурају тачну значењску категоризацију делова у погледу технолошких одлика и на основу тога, предложи целисходан стандардни технолошки поступак, операцију или захват.

### 2.1.3 ПРЕДУСЛОВИ ЗА ПРИМЕНУ *CAPP/CAM* СИСТЕМА

Примена *CAPP/CAM* система у развојним и производним окружењима захтева одговарајућу рачунарску и комуникациону опрему. *CAPP/CAM* апликације су често веома захтевне у погледу рачунарских опреме и из тог разлога се препоручује да рачунари који се користе за рад ових апликација буду опремљени најсавременијим централним и графичким процесорским јединицама. Такође, за несметан рад ових апликација, потребно је располагати довољном количином рачунарске меморије, како оперативном, тзв. RAM, тако и трајним меморијским складиштима, на тзв. „рачунарским дисковима” HDD или SSD. Како се рачунарске апликације веома често мењају и унапређују, што повлачи са собом и захтев за унапређењем хардверских ресурса, незахвално је дава-

ти препоруке о конкретним вредностима рачунарских перформанси и ресурса. Обично постоји препорука произвођача софтвера да се на рачунарима, на којима се инсталира CAPP/CAM софтвер, не инсталира превелики број разноразних апликација, већ само неопходан скуп како би се смањио ризик могућег нарушавања номиналних перформанси рачунара и саме апликације. Што се тиче комуникационе опреме којом се обезбеђује висок ниво размене података између рачунара и других периферних електронских уређаја<sup>19</sup>, како у погледу брзине, тако и у погледу количине података, савремено развојно-производно окружење мора бити опремљено одговарајућом информационо-комуникационом опремом и софтвером, што подразумева најчешће жичану и оптичку рачунарску мрежу, 4G или 5G бежичну комуникациону инфраструктуру (Слика 2-22).



**Слика 2-22** Схеми информатичко-комуникационе инфраструктуре савремених сајбер-физичких производних система у којој се инсистира на интензивној комуникацији између машина и *ИIoT* - „*machine to machine*” (*M2M*) комуникација.<sup>20</sup>

Коначно, примена CAPP/CAM апликација постаје у потпуности смислена тек у случају када производно окружење располаже машинама које су нумерички управљане (NC), тј. управљане помоћу рачунара (CNC), јер без НУ машина моделирани технолошки поступци не могу бити остварени у пракси (Слика 2-23).

<sup>19</sup> Разни сензори и друге врсте електронских уређаја у простору технолошког система који су опремљени модулима за комуникацију путем рачунарске мреже, тзв. *интернет ствари* - *IoT* (*Internet of Things*) и *индустријске интернет ствари* - *ИIoT* (*Industry Internet of Things*).

<sup>20</sup> Извор: Modern Machine Shop Online ([www.mmsonline.com](http://www.mmsonline.com))



Слика 2-23 Приказ дела погона опремљеног DMG Mori CNC машинама.

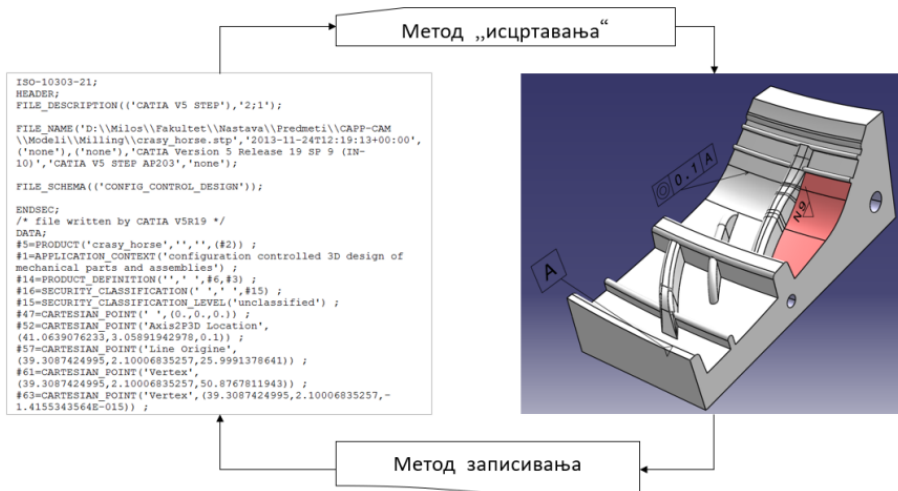
## 2.2 УЛАЗНО-ИЗЛАЗНИ ФОРМАТИ ПОДАТАКА У *CAPP/CAM* АПЛИКАЦИЈАМА

Одредница *data format* или „формат податка” служи да означи начин записивања, за одређену рачунарску програмску апликацију, релевантних података. Најбољи пример који то илуструје је приказ записа (дела датотеке) 3D геометријског модела машинског дела (Слика 2-24). На слици је могуће видети како изгледа део тзв. *STEP* датотеке у *ASCII*<sup>21</sup> кодном запису, а која служи да се на основу ње, у одговарајућој рачунарској програмској апликацији (конкретно у овом случају, ради се о *Dassault Systemes Catia*), изврши исцртавање те геометрије у „прозору” апликације за визуелизацију геометрије.

Да би се подаци могли размењивати између сродних рачунарских програмских апликација које се користе за развој производа и технологије попут *CAD*, *CAE*, *CAPP/CAM*, као и између свих других апликација из домена *Product Lifecycle Management*-а, веома је важно осигурати „читљивост” датотека насталих у тим апликацијама. Та читљивост, заправо, омогућава једној апликацији да прочита и прикаже кориснику податке из датотеке коју је створила друга апликација. На тај начин се омогућава да се ти подаци размењују између више различитих апликација.

---

<sup>21</sup> *ASCII* је акроним за одредницу *American Standard Code for Information Interchange*.



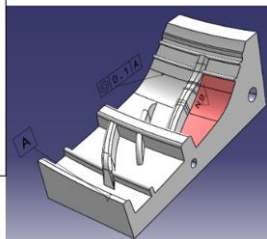
**Слика 2-24** Приказ заглавља датотеке која „чува“ податке о 3D геометрији дела као и остале релевантне податке као што су квалитет површине и толеранција облика.

У контексту рачунарски подржане производње, прописани, односно моделирани технолошки поступак у *CAPP/CAM* апликацији је потребно послати управљачкој јединици неке машине са нумеричким/рачунарским управљањем како би, потом, рачунарска апликација те управљачке јединице погонила извршне органе те машине и алате да обаве све прописане обрадне радње. Дигитални модел прописаног технолошког поступка је заправо датотека која у себи садржи све релевантне податке потребне да управљачка јединица CNC машине, односно програмска апликација која је инсталирана на управљачкој јединици, погони машину и алате на одговарајући начин следећи инструкције записане у поменутој датотеци. Да би апликација која је инсталирана у управљачкој јединици CNC машине могла да „прочита“ инструкције записане у датотеци коју је створила *CAPP/CAM* апликација потребно је да постоји унапред утврђен начин записивања података, *формат података*, који је читљив за обе апликације. Такође, да би *CAPP/CAM* апликација могла да се користи за моделирање технолошког поступка, она мора бити у стању да прочита датотеку која је дигитални запис геометрије и других релевантних одлика дела који треба обрадити, а која је настала у неком *CAD* софтверу (Слика 2-25). Према томе, у погледу *CAPP/CAM* апликација, потребно је осигурати читљивост улазних *CAD* датотека приликом учитавања геометрије, а након што се измоделира технолошки поступак, потребно је осигурати читљивост излазне датотеке коју генерише *CAPP/CAM* апликација за рачунарску апликацију која погони CNC машину.



[illegible]

### Визуелизација улазне датотеке

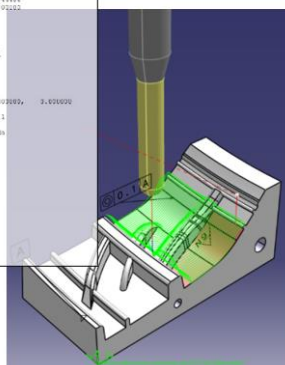


**Улазна датотека**  
Геометријске,  
функционалне и  
технолошке  
одлике дела

САРР/САМ апликација  
(обрада улазних  
података)

**Излазна датотека:**  
Модел технолошког  
група, инструкције за  
CNC машину

17	17	Generated on 14 December 2004 21:22:43	
18	18	Copyright (c) 2004, IBM Corp.	
19	19	IBM Corp. All rights reserved.	
20	20	IBM Corp. All rights reserved.	
21	21	IBM Corp. All rights reserved.	
22	22	IBM Corp. All rights reserved.	
23	23	IBM Corp. All rights reserved.	
24	24	IBM Corp. All rights reserved.	
25	25	IBM Corp. All rights reserved.	
26	26	IBM Corp. All rights reserved.	
27	27	IBM Corp. All rights reserved.	
28	28	IBM Corp. All rights reserved.	
29	29	IBM Corp. All rights reserved.	
30	30	IBM Corp. All rights reserved.	
31	31	IBM Corp. All rights reserved.	
32	32	IBM Corp. All rights reserved.	
33	33	IBM Corp. All rights reserved.	
34	34	IBM Corp. All rights reserved.	
35	35	IBM Corp. All rights reserved.	
36	36	IBM Corp. All rights reserved.	
37	37	IBM Corp. All rights reserved.	
38	38	IBM Corp. All rights reserved.	
39	39	IBM Corp. All rights reserved.	
40	40	IBM Corp. All rights reserved.	
41	41	IBM Corp. All rights reserved.	
42	42	IBM Corp. All rights reserved.	
43	43	IBM Corp. All rights reserved.	
44	44	IBM Corp. All rights reserved.	
45	45	IBM Corp. All rights reserved.	
46	46	IBM Corp. All rights reserved.	
47	47	IBM Corp. All rights reserved.	
48	48	IBM Corp. All rights reserved.	
49	49	IBM Corp. All rights reserved.	
50	50	IBM Corp. All rights reserved.	
51	51	IBM Corp. All rights reserved.	
52	52	IBM Corp. All rights reserved.	
53	53	IBM Corp. All rights reserved.	
54	54	IBM Corp. All rights reserved.	
55	55	IBM Corp. All rights reserved.	
56	56	IBM Corp. All rights reserved.	
57	57	IBM Corp. All rights reserved.	
58	58	IBM Corp. All rights reserved.	
59	59	IBM Corp. All rights reserved.	
60	60	IBM Corp. All rights reserved.	
61	61	IBM Corp. All rights reserved.	
62	62	IBM Corp. All rights reserved.	
63	63	IBM Corp. All rights reserved.	
64	64	IBM Corp. All rights reserved.	
65	65	IBM Corp. All rights reserved.	
66	66	IBM Corp. All rights reserved.	
67	67	IBM Corp. All rights reserved.	
68	68	IBM Corp. All rights reserved.	
69	69	IBM Corp. All rights reserved.	
70	70	IBM Corp. All rights reserved.	
71	71	IBM Corp. All rights reserved.	
72	72	IBM Corp. All rights reserved.	
73	73	IBM Corp. All rights reserved.	
74	74	IBM Corp. All rights reserved.	
75	75	IBM Corp. All rights reserved.	
76	76	IBM Corp. All rights reserved.	
77	77	IBM Corp. All rights reserved.	
78	78	IBM Corp. All rights reserved.	
79	79	IBM Corp. All rights reserved.	
80	80	IBM Corp. All rights reserved.	
81	81	IBM Corp. All rights reserved.	
82	82	IBM Corp. All rights reserved.	
83	83	IBM Corp. All rights reserved.	
84	84	IBM Corp. All rights reserved.	
85	85	IBM Corp. All rights reserved.	
86	86	IBM Corp. All rights reserved.	
87	87	IBM Corp. All rights reserved.	
88	88	IBM Corp. All rights reserved.	
89	89	IBM Corp. All rights reserved.	
90	90	IBM Corp. All rights reserved.	
91	91	IBM Corp. All rights reserved.	
92	92	IBM Corp. All rights reserved.	
93	93	IBM Corp. All rights reserved.	
94	94	IBM Corp. All rights reserved.	
95	95	IBM Corp. All rights reserved.	
96	96	IBM Corp. All rights reserved.	
97	97	IBM Corp. All rights reserved.	
98	98	IBM Corp. All rights reserved.	
99	99	IBM Corp. All rights reserved.	
100	100	IBM Corp. All rights reserved.	



### Визуелизација излазне датотеке

**Слика 2-25** Приказ протока и обраде податка у процесу моделирања технолошког поступка.

Различити произвођачи *CAD/CAM/CAE* софтвера користе различите програмске модуле за формирање и исцртавање геометрије објеката, тзв. „језгра геометријских моделера”<sup>22</sup> или само „геометријска језгра”. У табели (Табела 2-1) приказане су најпознатије комерцијалне *CAD* апликације и геометријска језгра која те апликације користе. Свако геометријско језгро има посебан, себи својствен, начин или формат записивања података о геометрији у САх датотекама и то је обично недоступно (осим ако се не ради о *open source* језгру). То чини формате *CAD* датотека различитих *CAD* апликација неподударним и нечитљивим. На пример, *CAD* датотеку формирану у Inventor-у (до скоро) није било могуће прочитати и исцртати у Срео софтверу осим ако се нема посебан модул који омогућава размену података са AutoDesk-овим *CAD* датотекама. У савре-

<sup>22</sup> Geometric modeling kernel.

меним извођењима *CAD* апликација све чешће је присутна опција да се *CAD* датотека формирана у другој *CAD* апликацији може учитати и приказати геометрија. Ипак, ова опција не дозвољава да се види оригинална структура модела, већ се модел третира као тзв. „увезени” модел. Такође, ова опција је од скоро могућа само за најпознатије *CAD* апликације.

**Табела 2-1** *CAD/CAM/CAE* софтвер и одговарајућа геометријска језгра.

<b><i>CAD/CAM/CAE</i> софтвер</b>	<b>Произвођач</b>	<b>Језгро геометријског моделера (Kernels)</b>
AutoCAD, Inventor, Fusion360	AutoDesk	ShapeManager (на основу ACIS*)
SolidWorks	Dassault Systèmes	Parasolid
NX PLM	Siemens	Parasolid
Creo	PTC	Granite
Catia	Dassault Systèmes	Convergence Geometric Modeler CGM
Oneshape	PTC	Parasolid
SolidEdge	Siemens	Parasolid
Master CAM	CNC Software, LLC	Parasolid
Gibbs CAM	Cimatron	Parasolid
Feature CAM	AutoDesk	Parasolid
Edge CAM	Vero Software Ltd	Parasolid
Delcam	AutoDesk	ACIS & Parasolid
Hypermill	Open Mind Technologies AG	Designbase
Ansys CAE	ANSYS Inc	ACIS & Parasolid
Abaqus CAE	Dassault Systèmes	ACIS
Moldflow CAE/ CAM	AutoDesk	Parasolid
Rhinoceros 3D	Robert McNeel & Associates	Troutlake

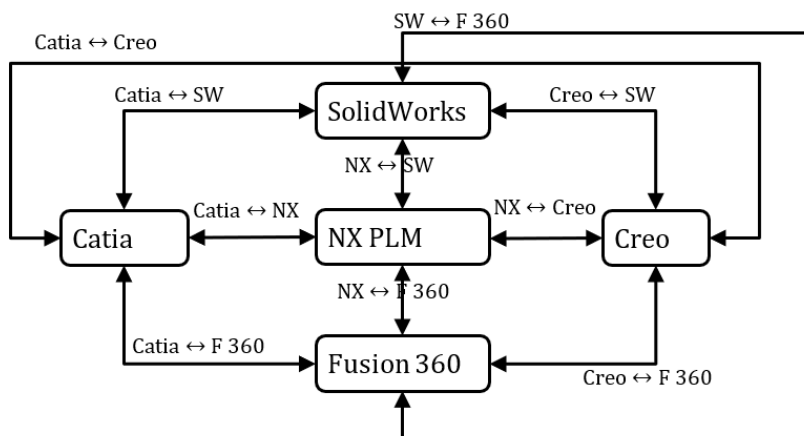
\* ACIS је језгро које је развио Spatial Solutions који је део Dassault Systèmes

У пракси, неподударност начина записивања података о геометрији (*CAD* датотеке) доноси потешкоће у размени података између различитих *CAD* апликација и последично велике трошкове који се процењују на више од шест милијарди долара на годишњем нивоу, глобално. Постоје два приступа за превазилажење неподударности формата *CAD* датотека између различитих *CAD* апликација:

1. Директан приступ се заснива на постојању посебних модула *PLM CAx* апликација који служе за директну размену података чиме се корисницима *CAx* апликације омогућава да запишу инхерентну *CAx* датотеку у формату друге апликације (Слика 2-26). Овакав приступ се примењује најчешће у компанијама које из одређених разлога, у различитим секторима развоја користе различите *CAx* апликације. Пример за то је Volkswagen



група у којој се у једном делу развоја користи *PTC Creo*, у другом *Dassault Systemes Catia*, а у трећем *Siemens NX PLM*. У овом случају, клијент је због својих разлога вољан да инвестира у тзв. директне *преводиоце*.



**Слика 2-26** Приказ директне размене података између различитих САх апликација.

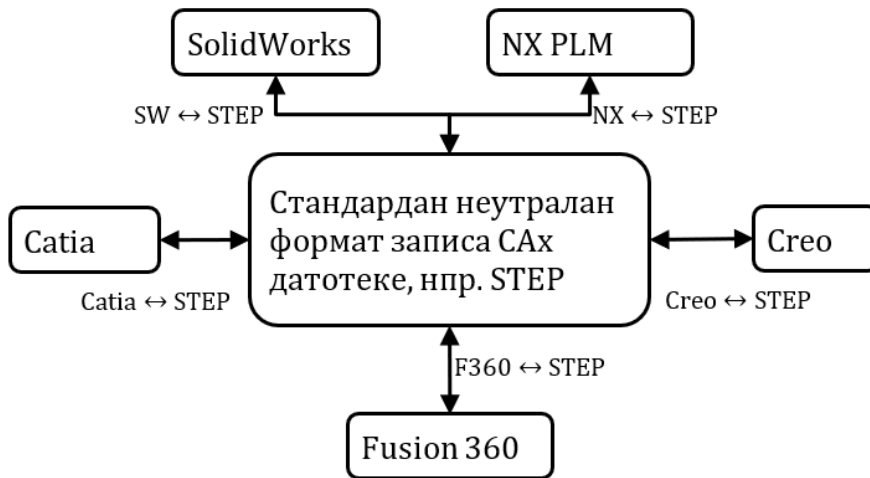
2. Индиректан приступ је много чешћи и он се заснива на размени података преко тзв. *стандардног неутралног формата* какви су нпр. *STEP*<sup>23</sup>, *IGES*<sup>24</sup> (igs), *DXF*<sup>25</sup> и *STL*<sup>26</sup> (Слика 2-27). У овом случају, корисник захтева да САх апликација запише податке о геометрији објекта који је формирао у датотеку неког од *стандардних неутралних формата* записивања намењених размени података. Такву датотеку сваки САх софтвер може „прочитати” и исцртати. *IGES*, *DXF* и *STL* формати су намењени за размену само геометријских података, док *STEP* формат омогућава да се у њему запишу и друге одлике попут толеранције, масе, материјала, па и података везаних за производњу. Међутим, оно што остаје „сакривено” овим форматима јесте оригинална структура стабла модела објекта, односно начин на који је модел изграђен (историја моделирања).

<sup>23</sup> **ST**andard for the **E**xchange of **P**roduct **M**odel **D**ata

<sup>24</sup> **I**nitial **G**raphics **E**xchange **S**pecification

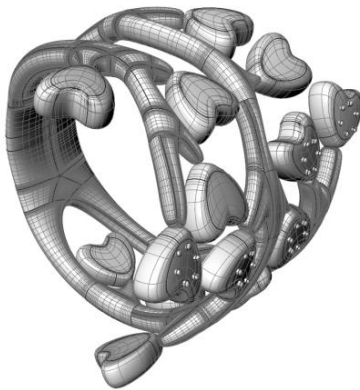
<sup>25</sup> **D**rawing **E**xchange **F**ormat

<sup>26</sup> **S**tandard **T**riangle **L**anguage (**S**tandard **T**essellation **L**anguage)

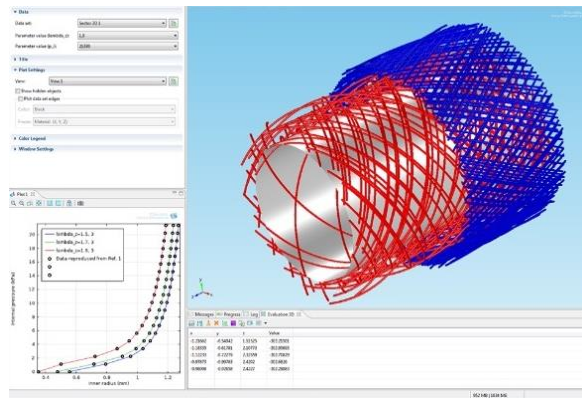


**Слика 2-27** Приказ примера размене података између различитих CAx апликација преко неутралног, стандардног формата STEP.

Као што је већ поменуто, поред геометрије и топологије, подаци који се налазе у CAD датотекама могу носити информацију и о материјалу објекта, о светлости амбијента, затим о физичким одликама дела као што су маса, еластичност, затезна чврстоћа, термичка и електрична проводност и др. (Слика 2-28)



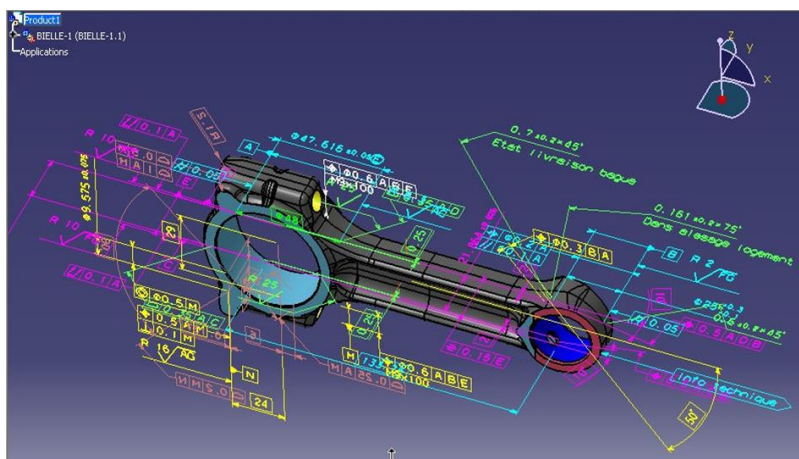
а) Геометрија и топологија објекта



б) Физичке одлике компоненти

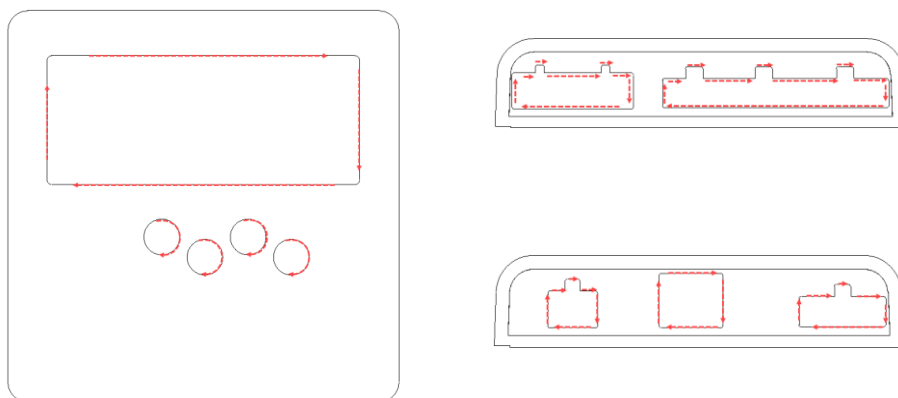
**Слика 2-28** Визуелизација одлика објекта који су формиран у CAx апликацији.

Такође, те датотеке могу носити информације које су од важности за прописивање технолошког поступка попут толеранције називних мера и облика, квалитета површина, детаље саставница у случају склопа и др. (Слика 2-29).



Слика 2-29 Приказ ознака дозвољених одступања називних мера и облика као и квалитета и начина добијања површина на објекту (Catia).

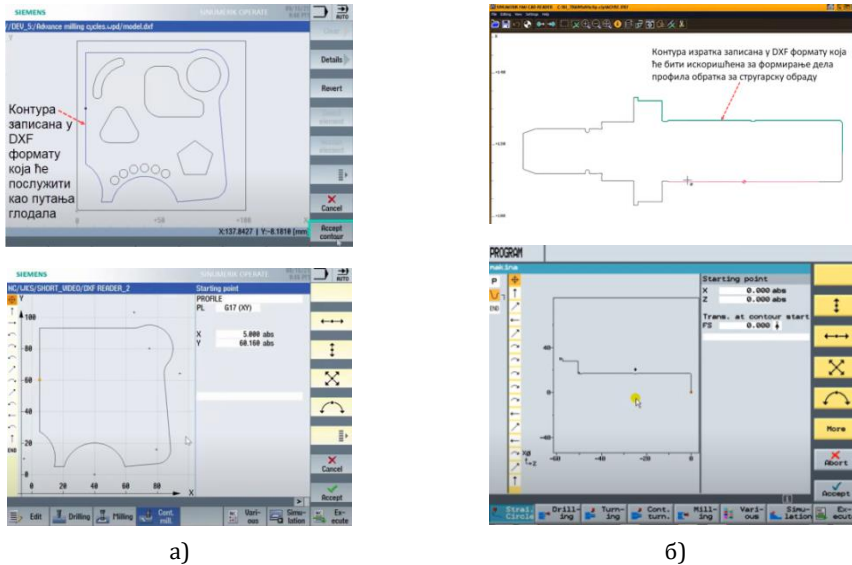
С обзиром на то да су улазне датотеке за *CAPP/CAM* апликације углавном оне које настају у некој *CAD* програмској апликацији, треба разликовати 2D и 3D улазне датотеке. 2D или дводимензионални облици су обично контуре које се користе у *CAPP/CAM* апликацији за моделирање тзв. 2D или 2.5D обрадних операција. Типични примери оваквих операција су сечења по дводимензионалној контури (Слика 2-30) попут електро-ерозионог сечења жицом, сечења ласером, сечење воденим млазом, гравирање и сл. У пракси, најчешћи формат записа оваквих објеката јесте ***dxf***<sup>27</sup>.



Слика 2-30 Приказ \*.*dxf* датотеке са 2D контурама по којима ће вршити исецање.

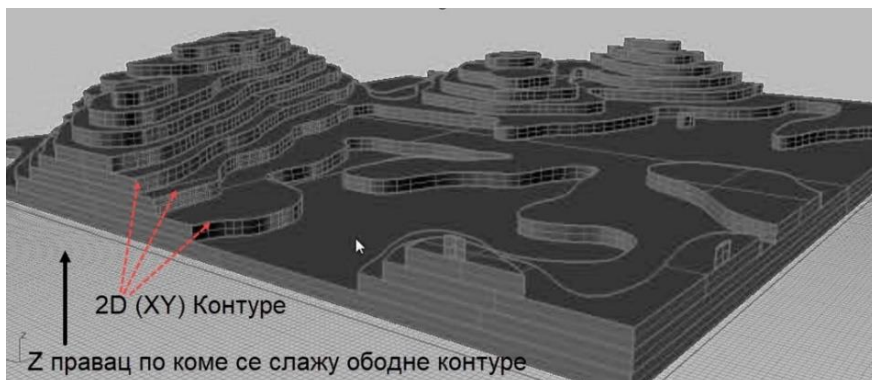
<sup>27</sup> Алтернативно, у пракси се налазе и 2D цртежи записани у датотекама са форматом ***cdr*** (креирани у *Corel Draw*) или са форматом ***ai*** (креирани у *Adobe Illustrator*).

Такође, 2D контуре се могу користити као улазне датотеке за CAM апликације које су инсталиране на управљачким јединицама CNC машина (нпр. *Sinumerik ShopMill*, *ShopTurn*). 2D контуре записане у DXF формату могу се учитати у ове апликације и искористити за формирање референтног профила који се, потом, користи за дефиницију путање алата приликом стругања или глодања (Слика 2-31).



**Слика 2-31** Приказ коришћења 2D контуре записане у DXF формату као референце за формирање путање алата;  
(а) извор: [DXF-Reader with SINUMERIK](#) (б) извор: [Zefer Yerkazan](#).

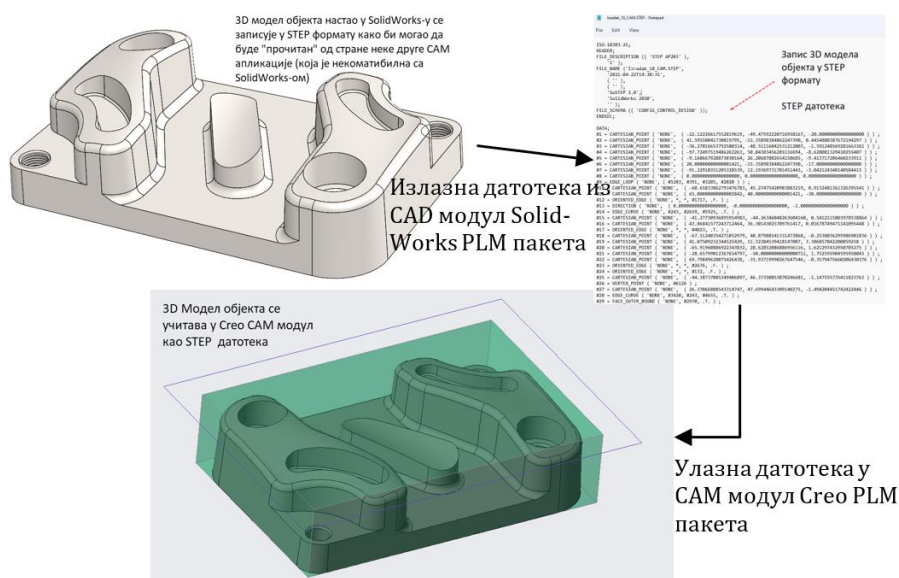
Специфични случајеви су они у којима улазна датотека у CAPP/CAM апликацију садржи скуп 2D контура где се свака контура из скупа одликује посебном вредношћу у трећем правцу или димензији (Слика 2-32).



**Слика 2-32** Рељеф (3D модел) изграђен од 2D слојева дефинисаних ободним контурама.

Тада је тродимензионални облик објекта представљен серијом дводимензионалних ободних контура попречних пресека поређаних у одређеном правцу (у правцу треће димензије). Овакве улазне датотеке се користе за представљање, а потом и израду делова на машинама за додавање материјала у слојевима (*3D Printing, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing* и сл.).

Најчешће улазне датотеке за савремене *CAPP/CAM* апликације су 3D модели објеката (делова или склопова). У пракси, размена података о геометрији и топологији објеката између *CAD* и *CAPP/CAM* апликација, осим ако не припадају интегрисаном пакету (нпр. *CAD* и *CAM* модул *Creo PLM* пакета), углавном се обавља преко неутралног стандардног формата *STEP* (Слика 2-33).



**Слика 2-34** Приказ поступка преводјења 3D модела објекта из *CAD* апликације у *CAM* апликацију, чији су припадајући (нативни) формати датотека међусобно некомпатибилни, преко неутралног, стандардног *STEP* формат записа.

Одмах након што у *CAPP/CAM* апликацији започне моделирање технолошког поступка (операција и захвата) формира се датотека која представља дигитални запис поменутог модела технолошког поступка. Као и у случају *CAD* апликација, и код *CAPP/CAM* апликација формат дигиталног записа модела технолошког поступка је тзв. *припадајући* или *инхерентни* формат који је могуће ишчитати помоћу те исте *CAPP/CAM* апликације, али не и помоћу неке друге *CAPP/CAM* апликације. Оно што је посебно важно је да рачунарска програмска апликација која је инстали-

рана на управљачкој јединици CNC машине не може непосредно да пого- ни извршне органе машине и алате према инструкцијама које се налазе записане у тој датотеци, иако би требало то да чини, због тога што није у стању да чита дигиталне записе дате у *припадајућем* или *инхерентном* формату CAPP/CAM апликације. CAM апликација која је инсталирана на управљачкој јединици CNC машине може да чита и спроводи извршне инструкције записане у датотекама које су настале непосредним моде- лирањем (програмирањем) операција и захвата у тој CAM апликацији или у датотекама чији је формат записа технолошких инструкција *ста- ндардан* и *неутралан*. Најпознатији стандардни формат записа тзв. при- премно-извршних инструкција за машине алатке, али и друге рачунар- ски управљане, аутоматизоване машине, дефинисан је у опису синтаксе процедуралног рачунарског програмског језика RS-274<sup>28</sup>, који се у прак- си, колоквијално, најчешће назива и **G-кôд**<sup>29</sup>. Тај стандард је крајем 50- тих година 20. века развијен и уведен у праксу од стране стручњака технолошког института из Масачусетса ([МИТ](#)). Врло брзо, тај стандард је усвојен и у другим земљама, па је тако у Европи преведен и адаптиран (DIN стандард 66025), а потом је тај исти стандардни програмски језик уведен и у породицу ISO стандарда (ISO 6983, ревидиран 2020. године). Најчешће екстензије датотека које су записане у синтакси G-кôда, су: *.lс*, *.gcode*, *.tap*, *.mpt*, *.mpf*. Поред стандардног записа технолошких инструкци- ја у синтакси G-кôда, постоје и други стандардни и неутрални формати попут оних који се заснивају на синтакси APT<sup>30</sup> програмског језика или STEP-NC (ISO10303-238). Као и RS-274, и APT је развијен током касних 50- их година 20. века, такође на МИТ-у. APT је програмски језик вишег ни- воа у односу на RS-274 (синтакса савременог APT записа је варијанта синтаксе *Fortran* програмског језика) који је развијан с циљем да се инжењерима – технолозима олакша израчунавање просторне путање коју алат треба да прати приликом машинске обраде резања делова сло- жене геометрије у ваздухопловној индустрији. Данас већина савремених CAPP/CAM апликација формира излазне датотеке у APT формату. Нај- чешће екстензије датотека које су записане у синтакси APT-кода су *.cl*, *.clf*, *.ncl*. Након формирања APT датотека, потребно је извршити прево- ђење записа датог у APT синтакси на RS-274D (G-кôд) синтаксу која је читљива за већину управљачких јединица CNC машина, односно њених

---

<sup>28</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>

<sup>29</sup> У овом уџбенику се нећемо бавити G-кôдом нити инструкцијама које се у њему налазе детаљније јер то већ детаљно покривено у уџбенику за предмет Програмирање НУ- МА 1.

<sup>30</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/APT\\_\(programming\\_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/APT_(programming_language))



контролера. То превођење се назива **пост-процесирање** (Слика 2-35). АРТ синтакса је током времена унапређивана, а, такође, настало је и неколико „деривата“ синтаксе попут EXAPT<sup>31</sup>. Поједини деривати АРТ и EXAPT синтаксе се користе за програмирање рада не само CNC машина алатки (кретање извршних органа, технолошке и др. инструкције), већ и индустријских робота. STEP-NC представља проширење ISO 10303 STEP стандарда за размену информација о производу додавањем сродног стандарда за моделирање процеса машинске обраде ISO 14649. Тај стандард се званично означава са ISO 10303-238 или [AP238](#). Он је, као и STEP, дефинисан у рачунарском програмском језику *EXPRESS* (налик синтакси Pascal језика) који је специјално намењен моделирању података о производу. Треба знати да постоје и STEP-NC деривати који уместо *EXPRESS*, користе *XML* синтаксу. Ова еволуција је веома важна због тога што *XML* синтакса више одговара протоколима за размену порука у индустрији попут [OPC UA](#) и [MQTT](#). STEP-NC је развијен да би се превазишла три најчешћа проблема који се јављају приликом примене ISO 6983 односно RS-274 стандарда, тј. G-кода:

1. У G-коду се програмира путања центра алата у односу на координатни систем (осе) машине;
2. Синтакса G-кода је често недовољно прецизна, односно нема довољно семантичко одређење (не зна се тачно шта значи) и за правилно тумачење комплекснијих инструкција је потребно сагледавање више линија кода;
3. Произвођачи контролера и управљачких јединица CNC машина често проширују стандардни речник G-кода својим додатним функцијама, које нису читљиве за контролере других произвођача. (На пример, Siemens -ове додатне функције се не могу користити на Fanuc-овим управљачким јединицама јер ове не располажу тим додатним функцијама, односно Siemens-овом „проширеном“ синтаксом G-кода);

Помоћу STEP-NC формата операције обраде се описују у виду листе елементарних технолошких захвата и пролаза (тзв. *working steps*) које је могуће извести на одређеној машини користећи синтаксу објектно-оријентисаних програмских језика, а не, као што је то случај са операцијама обраде записаних у G-коду, кроз низ инструкција о непосредном кретању алата у односу на осе машине. Овакви описи захвата обраде

---

<sup>31</sup> EXtended Subset of APT (проширени скуп АРТ синтаксе) је развијен од стране немачког предузећа EXAPT Systemtechnik GmbH из Ахена. (<https://en.wikipedia.org/wiki/EXAPT>)

непосредно одговарају градивним елементима модела технолошког поступка, онаквим каквим су настали у CAPP/CAM апликацији (тзв. *manufacturing feature*-има или *CAM feature*-има). То, дакле, подразумева да сви параметри који дефинишу модел операције или захвата обраде, а који су подешени у CAPP/CAM апликацији, бивају пренети и у одговарајуће *working steps* STEP-NC записе који се могу прочитати од стране рачунарске апликације на управљачкој јединици и проследити контролеру машине. Треба истаћи да су управо произвођачи управљачких јединица и контролера одговорни за правилно „ишчитавање” *working steps* STEP-NC записа и интерпретацију у извршне инструкције машине. На тај начин се превазилази проблем тзв. пост-процесирања односно превођења из АРТ у G-кôд. Такође, велика предност STEP-NC формата записа модела технолошког поступка је у томе што овај стандард дозвољава двосмерну комуникацију, која се сматра неопходним у савременим производним окружењима где се инсистира на интензивној комуникацији између машина без посредства човека. STEP-NC формат дозвољава да поједине секције записа технолошке операције, које се нпр. тренутно спроводе, буду дописиване од стране апликације на управљачкој јединици CNC машине, чиме се омогућава да се информације о реализацији процеса у реалном времену прослеђују релевантним чиниоцима технолошког поступка (другим машинама у процесу, другим рачунарима и уређајима, оператерима и руководиоцима производње). Са друге стране, један од највећих изазова за увођење STEP-NC формата је у томе што непрестани развој CAPP/CAM апликација, а то се види у сталном стварању нових класа градивних елемената модела технолошког поступка, тзв. *CAM feature*-а, захтева стално проширивање библиотеке *working steps* STEP-NC записа. Данас, иако овај стандард још није широко усвојен, неминовно је да ће у скорој будућности он постати доминантан формат записа излазних датотека CAPP/CAM апликација. У међувремену, док STEP-NC стандардни неутрални формат не постане потпуно усвојен од стране произвођача CAPP/CAM апликација, остаје потреба за превођењем АРТ у G-кôд (Слика 2-35).



```

$
$
$-----
SYNCR/
$ 10.10
PPRINT Stezanje1
$ op-10
PPRINT gladanje
$CATIA0
Cutter-location датотека
$MSYSID/10.10,op-10,10.10
$ MSYS/
$ 0.00000 0.00000 0.00000 -93.00000
$ 0.00000 1.00000 0.00000 -93.00000
$ 0.00000 0.00000 1.00000 28.00000
$ ICAM - MM PPTABLE / ICAM_MM.pptable - V23.0-1913
$ Part operation : op-10
$ Manufacturing Program : 10.10
#1005/0/23,1913
PARTNO 10.10
UNITS/MM
$ $ do not diagnose multiple PARTNO commands
PFUN/15,1324001,OFF
$ $ do not diagnose missing FINI command
PFUN/15,1640005,OFF
$ $ do not diagnose CYCLE/OFF when cycles are not active
PFUN/15,1318046,OFF
$ $ do not diagnose FEDRAT when threading
PFUN/15,1319003,OFF
$ $ ignore TLAXIS commands, use vector on GOTO instead
SYN/ 'TLAXIS', '$$'TLAXIS'
$ $ OPERATION NAME : Tool Change.12
$ $ Start generation of : Tool Change.12
MULTAX/ON
FROM 0.00000, 0.00000, 100.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
$ $ TOOLCHANGEBEGINNING
CUTTER/ 20.00000, 0.800000, 9.200000, 0.800000, 0.000000,$
0.000000,11.000000
$ $ Select sequence 1 to exclude tool compensation
APPLY/MILL
OPTYPE/TOOL
TLNAME/ R3900-020C5-11L125
LOAD/TOOL,2
COOLNT/
$ $ TOOLCHANGEEND
$ $ End of generation of : Tool Change.12
OPNAME/'10.10.1
OPTYPE/MILL
SPINDL /D,
$ $ OPERATION NAME : 10.10.1
$ $ Start generation of : 10.10.1
PPRINT Profilisanje
FEDRAT/ 300.0000,RPM,CLW
SPINDL/ 4217.6069,RPM,CLW
GOTO 94.71203, -32.85856, 2.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
GOTO / 94.71203, -32.85856, -8.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
GOTO / 97.13893, -23.17273, -8.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
GOTO / 100.00000, 0.00000, 0.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
$
$
$-----

```

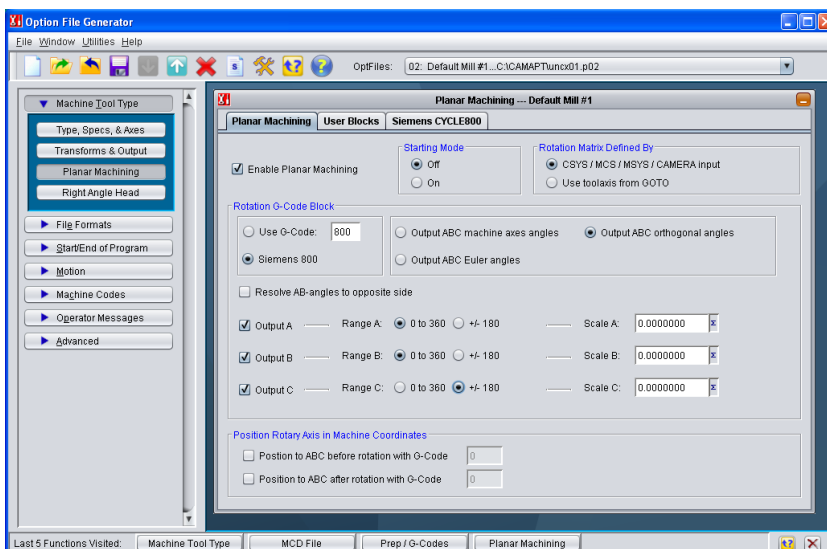
**Слика 2-35** Приказ CL датотеке записане у АРТ синтакси и одговарајуће датотеке NC датотеке записане у ISO 6983 формату (G-кôду).

Приликом превођења дигиталног записа модела технолошког поступка записаног у АРТ формату, што је, како је раније наведено, најчешћи формат излазних датотека савремених *CAPP/CAM* апликација, у G-кôд, могуће је да дође до грешака. Такве грешке доводе до немогућности интерпретације извршног програма од стране управљачке јединице, односно, немогућности извршавања програма, или непланираног и неодговарајућег релативног кретања алата и обратка током обраде, што даље води оштећењу алата, обратка или машине. Из тог разлога, превођење АРТ датотека у извршни G-кôд или тзв. пост-процесирање чини веома важан корак у употреби *CAPP/CAM* апликација. Без одговарајућег превођења, сав напор уложен у моделирање технолошких поступака, операција и захвата помоћу *CAPP/CAM* апликација остаје узалудан јер није могуће спровести те захвате, операције и поступке на НУ машини. Произвођачи *CAPP/CAM* апликација у своје софтвере уграђују програмске модуле који користе неке основне речнике са инструкцијама превођења (Vocabularies/Tables of Post-Processing Instructions) чиме је корисницима *CAPP/CAM* апликација омогућено да аутоматизовано преведу АРТ датотеку у извршни G-кôд. Ипак, такво превођење није увек довољно тачно с обзиром да се у пракси може наћи велика разноликост комбинација ва-

ријанти НУ машина, управљачких јединица и софтвера који су инсталирани на тим рачунарима. Из тог разлога, потребно је веома детаљно подесити речник са инструкцијама превођења као и сам програмски модул за превођење тзв. пост-процесор. Такође, приликом пуштања НУ машине у рад, конфигурациона датотека, којом се прецизно утврђују опције управљања НУ машине, може бити измењена у односу на иницијално подешени скуп конфигурационих опција инхерентног за одређену комбинацију:

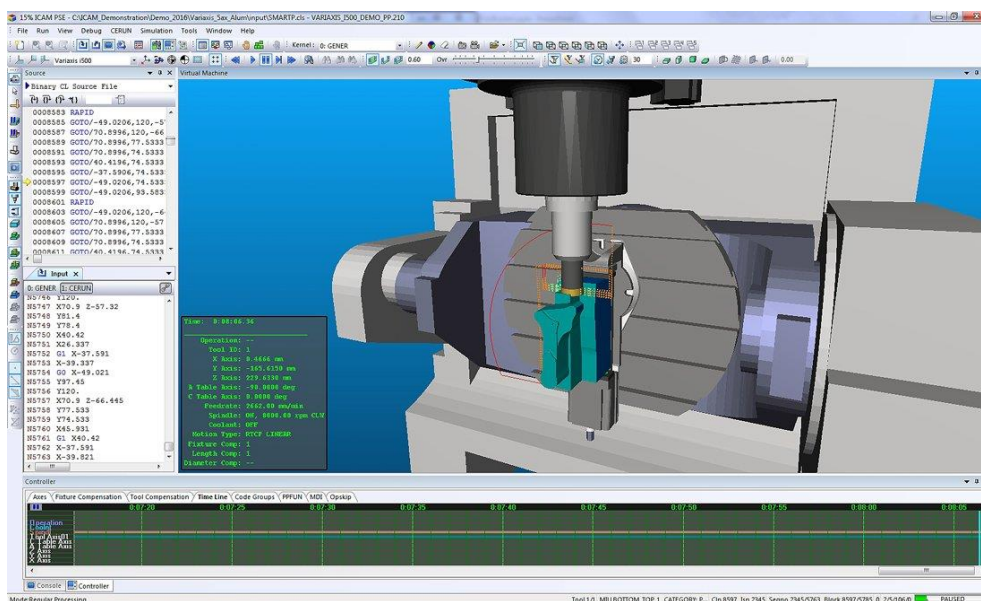
```
{
  варијанта НУ-машине,
  варијанта управљачке јединице,
  варијанта софтвера инсталираног на управљачкој јединици
}
```

У овом случају, додатно је отежано коришћење готових, у CAPP/CAM апликацији, иницијално понуђених пост-процесора. За такве ситуације произвођачи CAPP/CAM апликација су, у сарадњи са предузећима које се баве изработом и сервисирањем тзв. прилагођених пост-процесора посебним корисничким условима, попут ICAM, CGTech, Cenit, Gprost и др., понудили тзв. *генеричке пост-процесоре* (Слика 2-36). Генерички пост-процесор је програмски модул за превођење који корисник CAPP/CAM апликације може самостално или уз помоћ консултаната из тих специјализованих предузећа подесити својим специфичним радним условима.

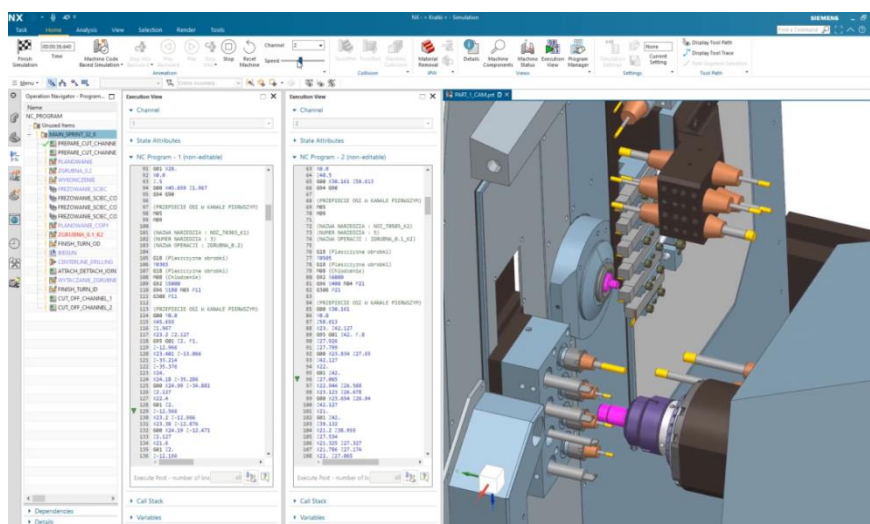


Слика 2-36 Приказ једног у низу корака којим се подешава речник са инструкцијама превођења (пост-процесирања) [G-Post](#).

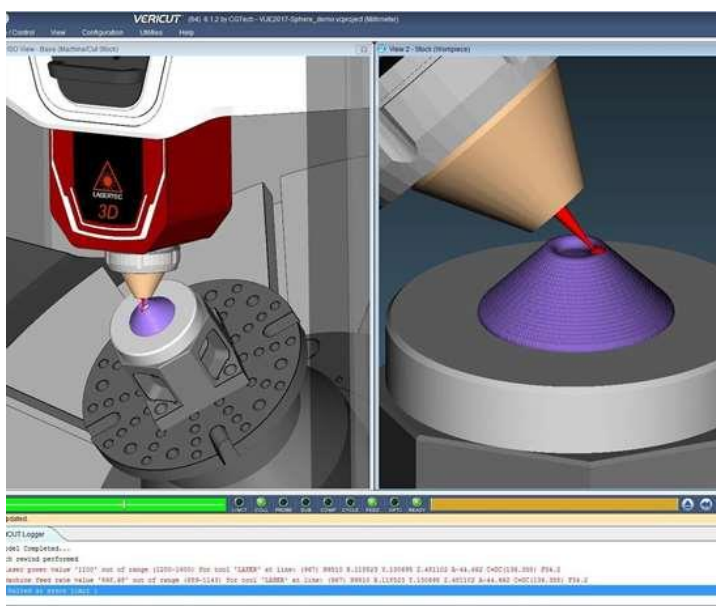
Истовремено, са појавом могућности самосталног подешавања пост-процесора, изникло је тржиште захтева корисника *CAPP/CAM* апликација за рачунарским програмским апликацијама које обављају верификацију, односно проверу, *превода* АРТ датотеке у извршни G-код, који је обавио тако подешени пост-процесор. Заправо, ради се о рачунарским програмским апликацијама које, попут уобичајених *CAPP/CAM* апликација, симулирају релативно кретање алата и обратка, али не на основу АРТ записа, већ на основу извршног G-кода који је добијен из превода стандардног или специјално-подешеног пост-процесора. Савремене апликације за проверу потврду ваљаности превода АРТ записа обрадних операција, односно верификацију G-кода, тзв. *CAM верификатори*, поред симулације алата и обратка, поседују базе података о великом броју различитих НУ машина, њихових варијанти извођења, као и управљачких јединица и одговарајућег софтвера инсталираног на њима. То омогућава *CAM верификаторима* да веома детаљно симулирају спровођење технолошког поступка, онако како би се он заиста одвијао приликом интерпретације добијеног G-кода од стране одређене управљачке јединице, приказујући при том и најситније детаље геометрије обратка, машине, алата и путање алата и свих других релевантних елемената (Слика 2-37, Слика 2-38 и Слика 2-39).



Слика 2-37 Приказ симулације 5-осног глодања у ICAM-овом CAM верификатору (<https://icam.com>).



**Слика 2-38** Приказ симулације поступка верификације G-кода за обраду цилиндричних делова на обрадним центрима помоћу CAM верификатора интегрисаног у NX PLM (<https://www.camdivision.pl/en/services/postprocessors>).



**Слика 2-39** Приказ симулације извршног G-кода за случај НУ машине која наноси материјал (адитивне технологије) у CAM верификатору Vericut CGTech<sup>32</sup>.

<sup>32</sup> <https://www.additivemanufacturing.media/products/vericut-version-821-includes-enhancements-for-additive-manufacturing>

Данас се све више произвођача *CAM* верификатора опредељује да рад ових програмских апликација понуде у окружењу Интернет претраживача (*web browser-a*) чиме је доступност ових дигиталних сервиса корисницима постала још већа. Наравно, за коришћење ових сервиса произвођачи *CAM* верификатора обично захтевају неку врсту претплате<sup>33</sup>, док неки самостални и мањи произвођачи *CAM* верификатора, који желе да се наметну тржишту, нуде своје сервисе бесплатно<sup>34</sup>.

---

<sup>33</sup> *Mastercam 2023 Onshape Connect Plugin* који садржи у себи свој верификатор *G*-кода кроз [Onshape](#) Master *CAM 2023 plugin* сервис.

<sup>34</sup> <http://ncviewer.com>, <https://camotics.org>

## ЛИТЕРАТУРА

- Chang, T. C., Wysk, R. A., Wang, H. P. (2006) Computer Aided Manufacturing (3rd ed.), Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-142919-1
- Devedžić, G. B. (2009). *CAD/ CAM tehnologije*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta Kragujevcu ISBN 978-86-86663-40-5
- Devedžić G. B. (2004). *Softverska rešenja CAD/ CAM sistema*, Mašinski fakultet univerziteta u Kragujevcu. ISBN 86-80581-67-4
- Fitzpatrick, M. (2005). *Machining and CNC Technology* (1st ed.). The McGraw-Hill Companies ISBN 0-07-825090-0  
<https://www.additivemanufacturing.media/products/vericut-version-821-includes-enhancements-for-additive-manufacturing>
- Kief, H. B., Roschiwal, H. A. and Schwarz K. (2022) *The CNC Handbook, Digital Manufacturing and Automation from CNC to Industry 4.0*, Industrial Press inc. ISBN (ePUB) 978-0-8311-9498-7
- Krar, S., F., Gill, A. R., Smid, P. (2005). *Technology of Machine Tools* (6th ed.). The McGraw-Hill Companies ISBN 987-0-07-830722-5
- Milošević M., Lukić D., Antić A., Lalić B., Ficko M., Šimunović G. (2017). e-CAPP: A distributed collaborative system for internet-based process planning, *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 210-223, ISSN 0278-6125
- Narang, J. C. (2010) *Computer Aided Manufacturing (CNC and Robotics)*, Dhanpat rai & co.
- Nikolić, D. M. (1997). *Projektovanje tehnoloških procesa I – Obrada rezanjem*. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. ISBN 86-7083-310-7
- Smid, P. (2007). *CNC Programming Handbook: Comprehensive guide to practical CNC programming* (3rd ed.). Industrial Press Inc. ISBN 0-8311-3158-6
- Stenerson, J, Curran, K. (2007). *Computer Numerical Control – Operation and Programming* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-111547-2
- Tepić, J., Todić, V., Lukić, D., Milošević, M., Borojević, S. (2011). Development of the Computer-Aided Process Planning (CAPP) System for Polymer Injection Mold Manufacturing, *Metalurgija*, 50(4), 273-277, , ISSN 0543-5846.
- Valentino, J. V., Goldenberg, J., (2008). *Introduction to Computer Numerical Control* (4th ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN-10: 0-13-243690-6
- Wang, X., Bi, Z. (2020). *Computer Aided Design and Manufacturing* (1st ed.), John Wiley & Sons Ltd. ISBN 9781119534211
- Xu, X., Klemm, P., Proctor F., Suh S. H. (2006). STEP-compliant process planning and manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 19(6), 491-494. doi: 10.1080/09511920600669776
- Xue, J. (2018) *Integration of CAD/CAPP/CAM* (1st ed.), Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston; Science Press, ISBN 978-3-11-057308-4
- Zivanovic, S., Vasilic, G. (2017). A New CNC Programming Method Using STEP-NC Protocol, *FME Transactions* 45(1):149-158, DOI: 10.5937/fmet1701149Z
- Ковачевић, Р., Станић, Ј., (1987). Компоненте рачунаром управљаних технолошких система, Рачунари NC, CNC, DNC. Научна књига.
- Манић, М., Спасић, Д., (1999). Нумерички управљане машине (прво издање), Машински факултет, Универзитета у Нишу, ISBN 86-80587-13-3

Зељковић, М. Табаковић, С., Живковић, А., Живановић, С., Млађеновић, Ц., Кнежев, М. (2018). Основе *CAD/CAE/CAM* технологија. Едиција „Техничке науке”, Департман за производно машинство, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.





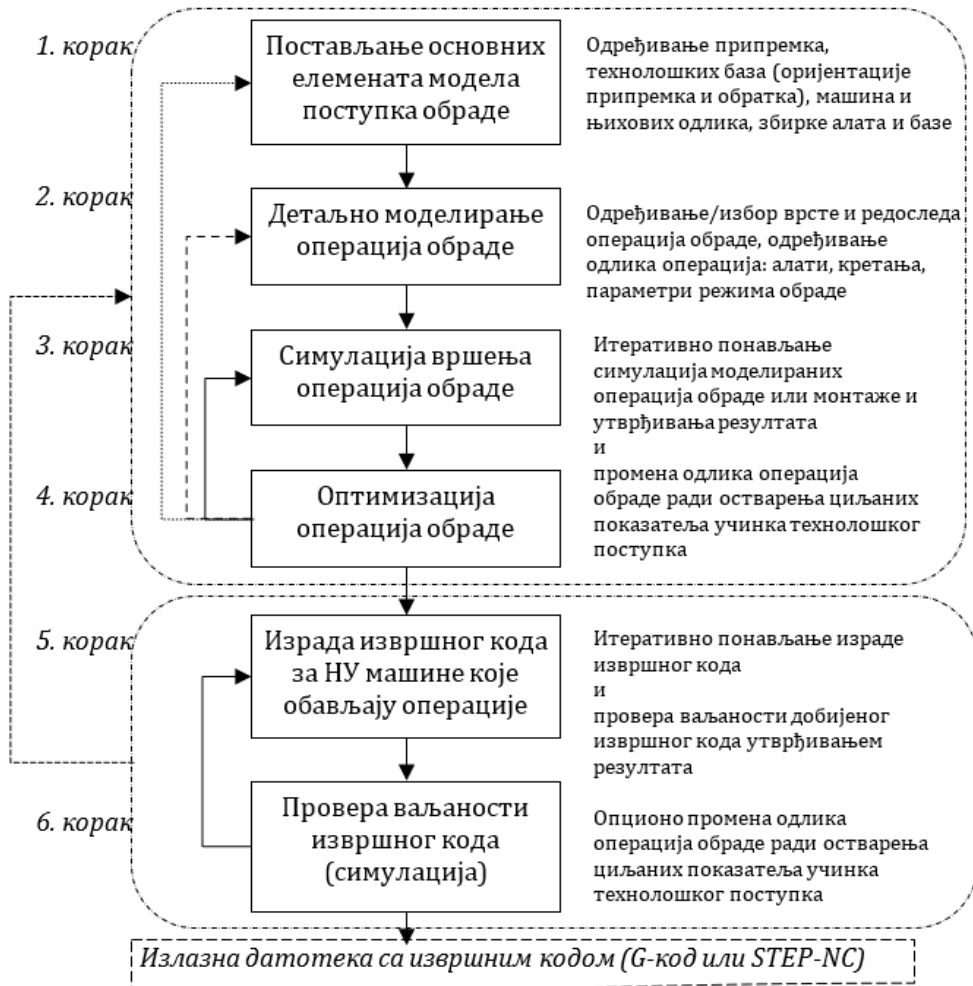
# 3 МОДЕЛИРАЊЕ ОПЕРАЦИЈА ОБРАДЕ РЕЗАЊЕМ

---

- 3.1 Постављање основних елемената технолошког поступка
    - 3.1.1 Постављање (подешавање) параметара машине
    - 3.1.2 План стезања и оријентација припремка/обратка/изратка у склопу
    - 3.1.3 Подешавање збирки алата обраде у *CAPP/CAM* апликација-ма
  - 3.2 Моделирање захвата обраде (резањем)
    - 3.2.1 Моделирање захвата обраде глодањем
    - 3.2.2 Моделирање операција контурних сечења
    - 3.2.3 Моделирање операција обраде стругањем
  - 3.3 Симулација и анализа
    - 3.3.1 Визуелизација захвата и операција
  - 3.4 Израда извршног програма и верификација
    - 3.4.1 Поступак израде извршног програмског кода
    - 3.4.2 Израда листе операција и захвата (process table)
- Литература



У контексту примене *CAPP/CAM* апликација за моделирање технолошког поступка, независно од врсте обраде којој је намењена (резање, деформисање, адитивне технологије, монтажа или нека друга), скоро свака *CAPP/CAM* апликација нуде корисницима сличан алгоритам рада (Слика 3-1).



Слика 3-1 Општи алгоритам рада са *CAPP/CAM* апликацијама.

### 3.1 ПОСТАВЉАЊЕ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНОЛОШКОГ ПОСТУПКА

Наставак излагања у овом поглављу је усмерен на моделирање операција обраде резањем са посебним освртом на сложеније операције глодања и стругања и, једним мањим делом, на 4-осне операције контурног сечења. Подсећамо, овакав садржај је условљен описом предмета

Програмирање НУМА 2 на МАС МФН. У додатним поглављима, која ће бити приређена у овом издању уџбеника, биће речи и о моделирању операција обраде деформисањем, моделирању операција додавања материјала у слојевима, као и о моделирању операција мерења и контроле облика и мера, али у не тако детаљном опису као што ће то бити случај са операцијама обраде резањем. Такође, већина примера, слика и описа, који ће се наћи у овом делу уџбеника, биће „узети” из примера практичне наставе и пројектних задатака студента на предмету Програмирање НУМА 2 (некадашњи назив *CAPP/CAM* системи). Из тог разлога у прилозима ће преовлађивати примери моделирања технолошких поступака помоћу *CAPP/CAM* модула PLM софтвера као што су Catia, Creo, SolidWorks који се користе на МФН-у.

На самом почетку моделирања технолошког поступка неопходно је извршити постављање (или подешавање параметара) тзв. основних или почетних елемената модела технолошког поступка у које спадају:

1. назив датотеке технолошког процеса (поступака) и остали параметри у вези са њеним одређењем у *PDM*<sup>1</sup> систему;
2. *производни склоп*, односно геометријски модел склопа кога најчешће чини:
  - а) модел изратка или модел тзв. референтног дела (референтног геометријског ентитета за обраду - *POGE*<sup>2</sup>),
  - б) модел припремка и
  - в) модели делова прибора за стезање припремка;
3. НУ машина (или више машина) на којој/којима ће се обављати операције обраде;
4. алати, односно збирка модела алата, који која ће се користити за обављање захвата обраде;
5. координатни систем (или више координатних система) операције и
6. збирке стандардних операција, тј. збирке листи стандардних захвата које корисник може да унапред измоделира и потом користи као *полазне, прикладне операције* и тако створи могућ-

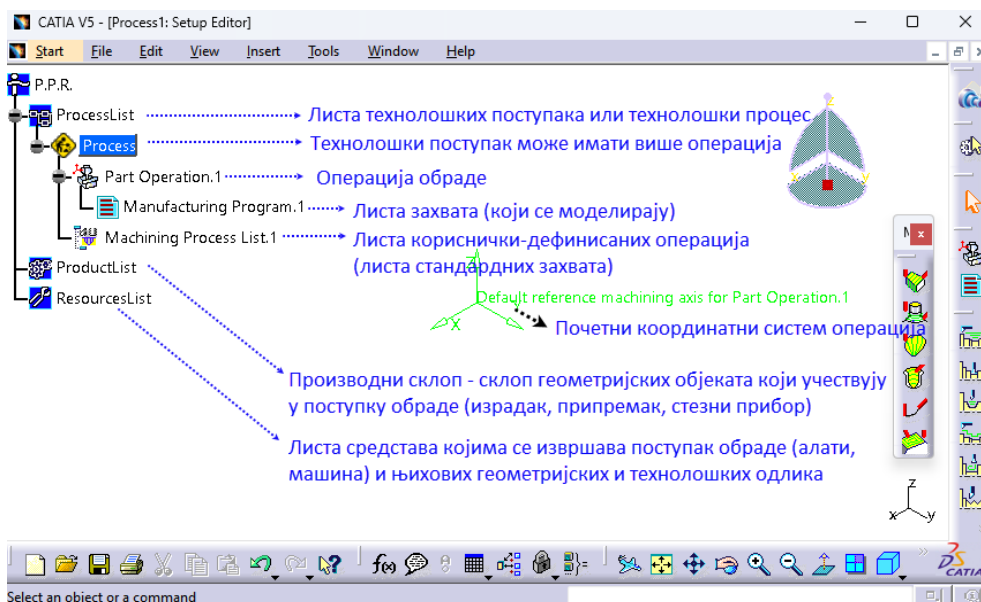
---

<sup>1</sup> *Product Data Management* систем је збирка рачунарских апликација или модула која служи за управљање и ажурирање свих датотека које су у вези са дигиталним моделом производа.

<sup>2</sup> *POGE* је акроним за *референтни обрадни геометријски ентитет* који ће се користити даље у тексту, а може се односити како на геометријски модел целог дела или склопа, тако и на само једну површину или сегмент површине (*patch, face, surface*) или линију, поли-линију или криву у једној равни или у простору, на основу које се, касније, формира геометрија кретања алата у захвату и/или операцији.

ност да знатно убрза процес моделирања технолошког поступка.

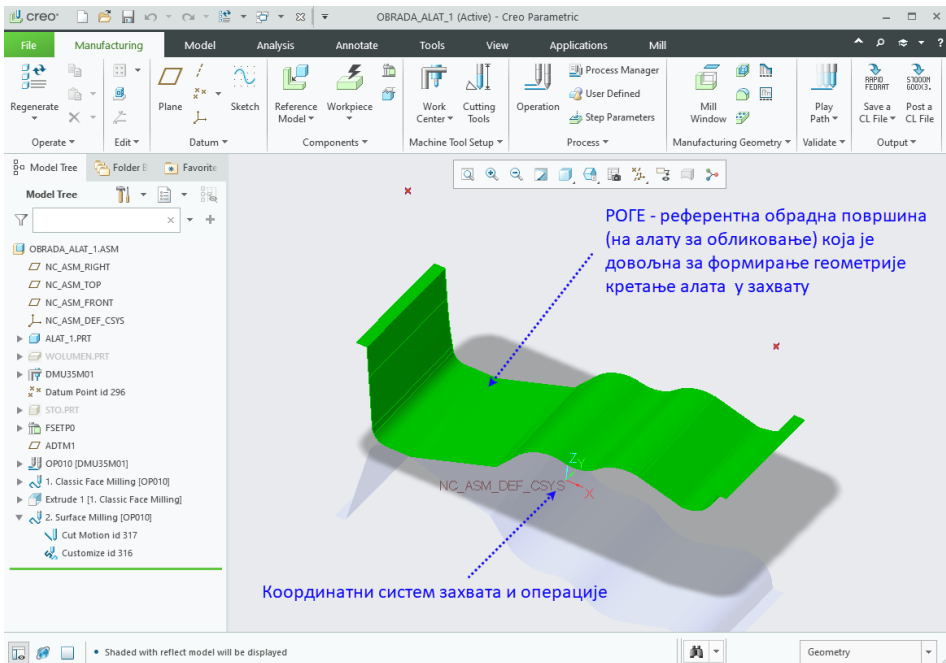
Те елементе модела технолошког поступка можемо видети на стаблу структуре тек формиране *CAPP/CAM* датотеке (Слика 3-2).



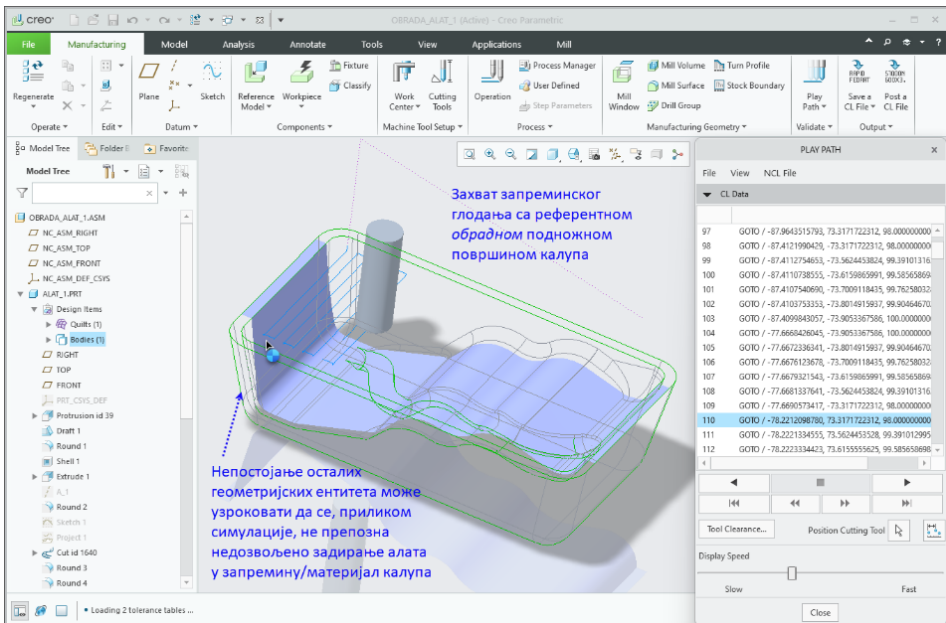
Слика 3-2 Структура тек формиране датотеке у Catia *CAPP/CAM* модулу.

Претходно наведени скуп основних или почетних елемената модела технолошког поступка представља тзв. *проширени скуп основних елемената*, јер треба знати да је могуће започети моделирање технолошког поступка већ са тзв. *минималним скупом почетних елемената* у које спадају: назив *CAPP/CAM* датотеке, основне одлике НУ машине, референти геометријски ентитет за обраду (РОГЕ) и координатни систем операције (Слика 3-3). Дакле, за добијање извршног G-кода није неопходно да се у *CAPP/CAM* апликацији уведе „комплетан” производни склоп, већ само РОГЕ. Ипак, недостатак осталих геометријских модела у производном склопу (припремак, израдак и стезни прибор) умањује учинак примене *CAPP/CAM* апликације, јер, без запремина тих модела, није могуће симулирати уклањање материјала и утврђивање могућег задирања алата у недозвољени простор (интерференција алата и стезног прибора или алата и дела изратка, који није обухваћен РОГЕ - Слика 3-4).

### 3 Моделирање операција обраде



Слика 3-3 Приказ референтне геометрије (подножна површина запремине) која се користи за формирање захвата или операције глодања запремине. (Creo CAPP/CAM модул).



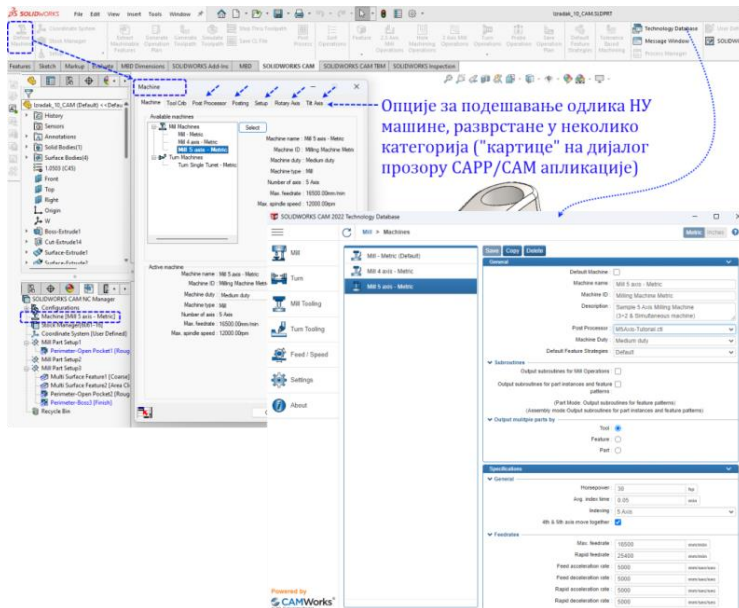
Слика 3-4 Приказ симулације путање глодала док врши запреминско глодање према захвату формираног на основу минималног РОГЕ.

Такође, све савремене *CAPP/CAM* апликације остављају могућност да се параметри који описују алат (геометрија, технолошке одлике и др.) могу касније, током тзв. детаљног моделирања операција и захвата, унети и подешавати. Кад је реч о поставкама у вези са НУ машином или машинама, за коју/које се моделира технолошки поступак, потребно је дефинисати, такође, само минимални скуп одлика попут врсте машине, оријентације/конфигурације, димензије радног простора и сл. Стандардни захвати и операције (које корисник може унапред измоделирати и потом користи као *полазне, прикладне захвате и операције*) само су додатна могућност која олакшава и убрзава стварање модела техно-лошког поступка, али њих, свакако, није неопходно имати да би се измоделирао технолошки поступак и створио одговарајући извршни код НУ машина.

### **3.1.1 ПОСТАВЉАЊЕ (ПОДЕШАВАЊЕ) ПАРАМЕТАРА МАШИНЕ**

Након што се обави сагледавање геометријских и функционалних одлика издатка, а потом и технолошких захтева, врши се утврђивање листе обрадних радњи, операција и захвата који су потребни да би се део израдио. Оно што карактерише једну технолошку операцију је израда на једној машини. Приликом стварања *CAPP/CAM* датотеке један од првих корака је избор НУ машине која ће се користити у изради разматраног издатка. Теоријски, то би значило да је на овом кораку могуће изабрати или осмислити било коју машину укључујући и замишљене, док је у пракси то ограничено на скуп стварних машина којима располаже погон или радионица. С тим у вези, у пројектном, технолошком бироу треба очекивати да *CAPP/CAM* апликација располаже претходно формираном збирком (каталогом, базом) НУ машина, где су сви релевантни параметри већ постављени, односно подешени, па се овај корак углавном своди на избор већ постојеће датотеке. Ипак, постоји могућност да се неки детаљи, односно параметри могу мењати са променом додатних стезних алата или прибора на машини. Било да се ради о првом уносу (опису) НУ машине или некој накнадној измени, кориснику *CAPP/CAM* апликације су на располагању многе опције којима се дефинишу одлике НУ машине намењене операцији која се моделира. У ове опције најчешће спадају (за које се обично очекује да се подесе):

- опције које прецизно утврђују врсту машине, њену конфигурацију и оријентацију (нпр. вертикална 5-осна глодалица - Слика 3-5);

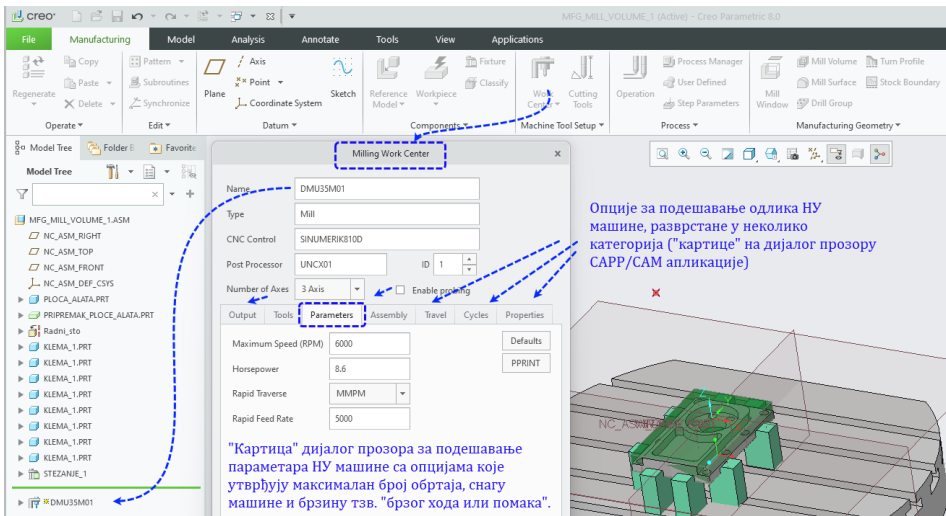


Слика 3-5 Приказ корака утврђивања параметара којима се дефинишу врста и одлике НУ машине у CAM модулу SolidWorks-a.

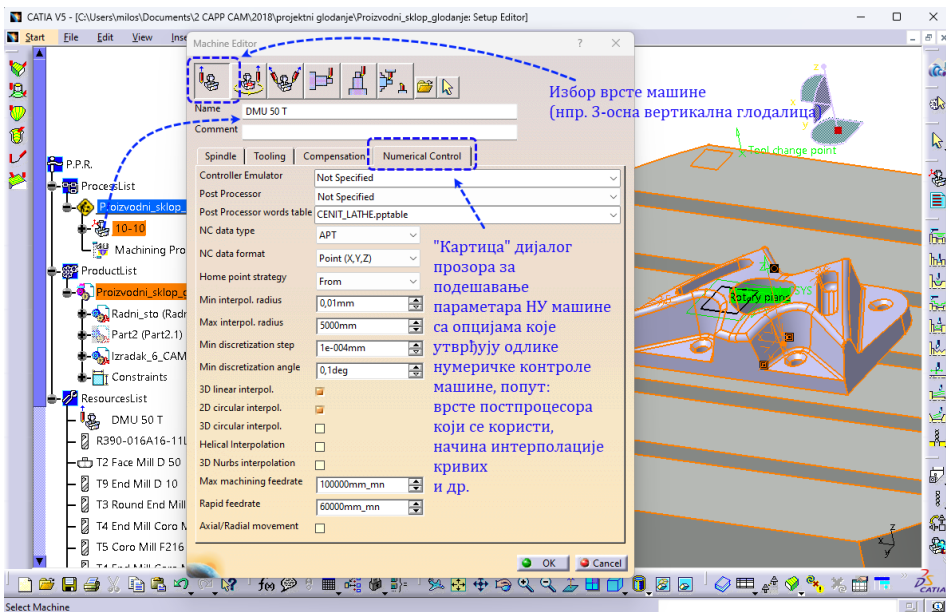
- опције за подешавање перформанси машина (снага, максималан број обртаја, максимална брзина помоћног кретања, тзв. *брзог хода* - Слика 3-6);
- опције за подешавање величине радног простора и координате битних тачака у вези са кретањем алата у току операција и захвата, попут тачке одакле се креће у (циклус или потпрограм) измену алата (*Tool change point*), или тачке одакле се креће у захват и где се алат враћа након обављеног захвата (*Home Point*);
- опције за подешавање које контролишу одлике постпроцесирања (превођења) извршног програма из АРТ формата у G-код, попут путање ка тзв. речнику инструкција за превођење и врсте пост-процесора, затим опције којима се утврђује да ли се интерполација кривих врши помоћу низа мањих кружница или помоћу сплајна, колике су димензионе границе интерполације и др. (Слика 3-7);
- опције за подешавање параметара који контролишу шта ће бити и на који начин представљено у излазној CAPP/CAM датотеци, попут опције која контролише да ли треба уврстити команду о активирању расхладног средства или не, или на који начин треба представити тзв. *компензацију* геометрије алата и сл.;



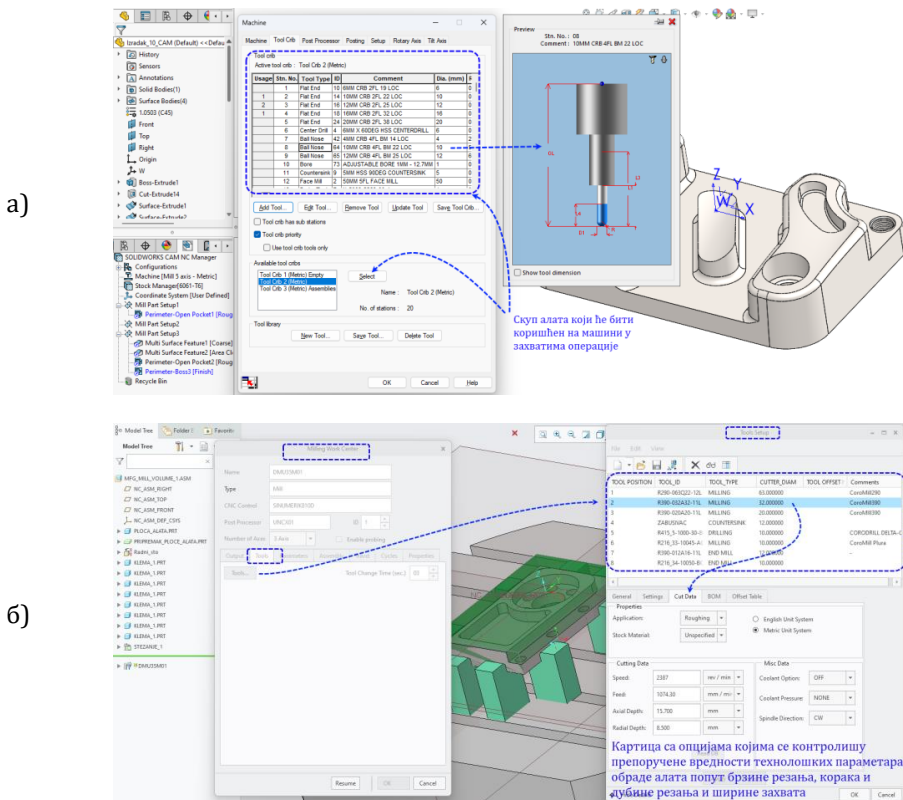
- опције за избор алата који ће бити коришћени у операцији и подешавање њихових геометријских и технолошких параметара (Слика 3-8).



Слика 3-6 Приказ корака утврђивања параметара којима се дефинишу врста и одлике НУ машине у CAM модулу Creo-а.

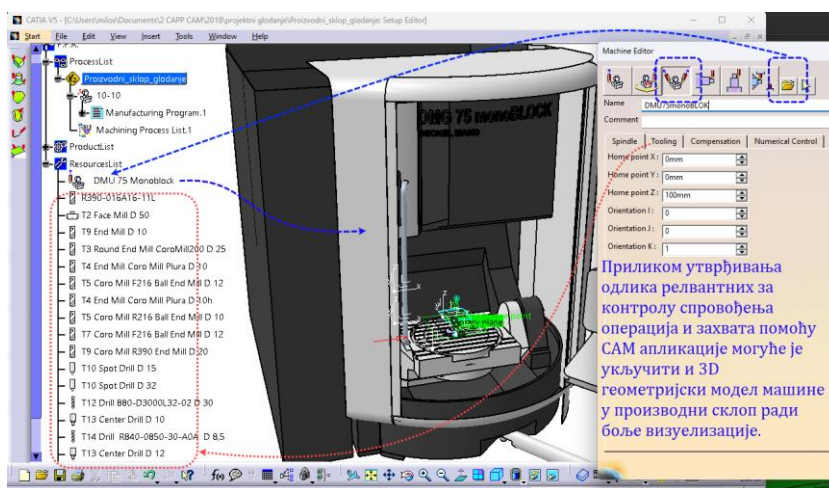


Слика 3-7 Приказ корака утврђивања параметара којима се дефинишу врста и одлике НУ машине у CAM модулу Catia.



**Слика 3-8** Приказ утврђивања параметара којима се дефинишу одлике алата приликом подешавања одлика НУ машине у *CAPP/CAM* апликацијама - (а) Подешавање параметара геометрије алата у *CAM* модулу SolidWorks-a; (б) Подешавања технолошких одлика алата у *CAM* модулу Creo-a.

Треба разумети да се подешавањима вредности свих тих параметара утврђују оне одлике НУ машине које су релевантне за управљање и контролу спровођења операција и захвата од стране *CAM* апликације. Дакле, то не значи да смо подешавањима тих одлика укључили геометријски модел машине у производни склоп *CAPP/CAM* апликације. Са друге стране, приликом подешавања параметара машине, могуће је „повезати“ одговарајући 3D геометријски модел склопа машине како би се на бољи начин визуализовала машина у виртуелном простору *CAPP/CAM* апликације (Слика 3-9). Да би тај геометријски модел био укључен и у симулацију захвата и операција, потребно је да се претходно у одговарајућем модулу утврде покретни и непокретни делови склопа машине, односно од покретних да се утврде они који се могу транслирати (у X, Y, Z правцу) и они који се могу ротирати (око X, Y, Z осе).



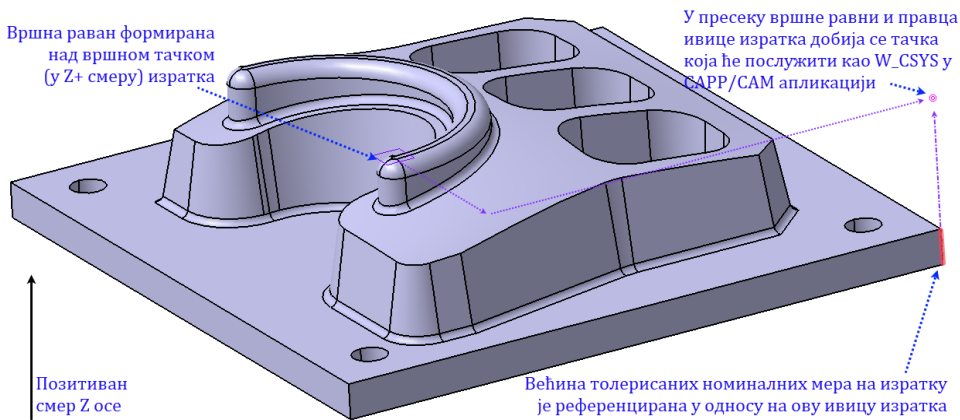
Слика 3-9 Приказ уметнутог геометријског модела машине у производни склоп *CAPP/CAM* датотеке, који је, при томе, повезан са подешеним одликама машине.

### 3.1.2 ПЛАН СТЕЗАЊА И ОРИЈЕНТАЦИЈА ПРИПРЕМКА/ОБРАТКА/ИЗРАТКА У СКЛОПУ

Следећи корак у моделирању поступка је утврђивање оријентације припремка и начина стежања (држања) припремка током операције. Приликом осмишљавања низа операција и захвата који треба да се спроведу, како би се израдио део на НУ машини, неопходно је утврдити најповољнију оријентацију припремка у односу на радни простор, односно координатни систем машине. Такође, неопходно је утврдити или изабрати локацију координатног почетка координатног система припремка или тзв. нулта тачка припремка -  $W_i$  тачка<sup>3</sup>) у односу на координатни почетак координатног система машине -  $M$ :  $(X_{W_i}^{(M)}, Y_{W_i}^{(M)}, Z_{W_i}^{(M)})$  као и оријентацију оса координатног система припремка у односу на одговарајуће осе координатног система машине. Подсећања ради,  $W_i$  тачка је она референтна тачка (или више њих, уколико операција захтева више стежања, односно више нултих тачака припремка) у односу на коју се координате карактеристичних тачака свих елемената путање алата (нпр. почетна и крајња тачка линијског или кружног ентитета путање) изражавају и бележе у извршном коду. Ово је веома важно имати на уму, с обзиром да ће се у излазној датотеци *CAPP/CAM* апликације (АРТ формат), а потом и у одговарајућем преводу (G-код, ISO 6983), сва „геоме-

<sup>3</sup> *Workpiece zero* или „нула припремка“ је одредница позната из предмета Програмирања НУМА 1 где се детаљно објашњава свака од карактеристичних тачака НУ машине и припремка  $(M, T, A, W_i, \dots)$ .

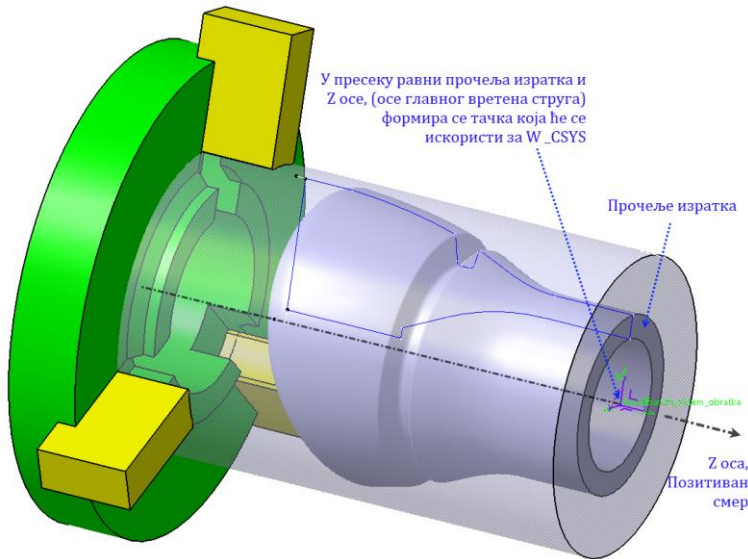
тријска места” бити забележена помоћу њихових координата у односу на  $W_i$ . Иако не постоји јасно правило како треба изабрати ову тачку или више њих, ако то операција захтева, ипак, постоји пар смерница којих се треба држати приликом избора. Најпре, за  $W_i$  -тачку треба изабрати неку *истакнуту* тачку припремка или, још боље, изратка која се може релативно лако „умерити”, односно, чија се локација у односу на координатни почетак координатног система машине **M** може утврдити помоћу расположивог начина и средства „умеравања” припремка<sup>4</sup>. Обично се препоручује да то буде нека тачка која је „директно повезана” са неким од номиналних мера изратка које су толерисане или са неким контурама или површинама изратка које су толерисане одговарајућим толеранцијама облика (геометријским толеранцијама). Образложење ове препоруке лежи у томе да се на тај начин увећава вероватноћа да се функционално важне мере, контуре и површине израде у траженој прецизности. Та тачка не мора да се поклапа са неком реалном тачком материјала изратка, већ може бити само замишљена тачка („у ваздуху”) (Слика 3-10). Такође, код глодања на вертикалној глодалици, где је Z-оса машине усмерена од радног стола навише (ка главном вретену), треба тежити да се за  $W_i$  -тачку бира нека вршна тачка изратка, тј. тачка са највишом котом у позитивном смеру Z-осе (Слика 3-10). То значи да ће вредност Z координата свих тачака путање алата бити увек негативна у зони обраде, тј. увек „у минусу” по z оси  $W_{i\_CSYS}$ .



**Слика 3-10** Приказ формирања референтних геометријских ентитета (тачака и равни) које ће бити коришћене у CAPP/CAM апликацији.

<sup>4</sup> Објашњење одреднице „умеравања” геометрије припремка као и „умеравање” алата, затим објашњење начина и средстава која се при томе користе, јесу детаљно разматрана на предмету Програмирање НУМА 1.

Када је моделирања операција стругања у питању, постоји неписано правило да се за  $W_i$  -тачку скоро увек бира тачка изратка која лежи на оси главног вретена струга (Z-оса машине) и истовремено се налази на прочељу (челу) изратка (Слика 3-11).

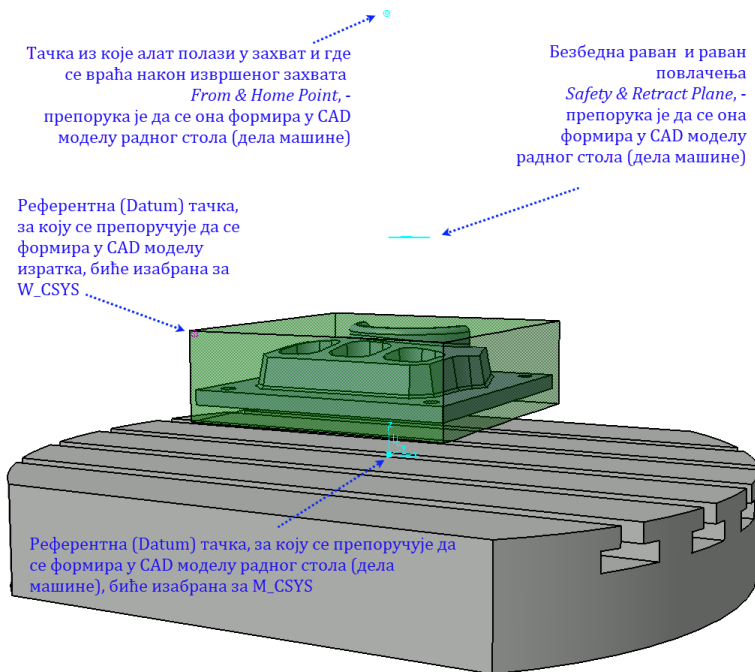


**Слика 3-11** Формирање референтне тачка изратка која ће се искористи за координатни почетак координатног система изратка/обратка/припремка W\_CSYS приликом моделирања операције стругања.

Ради једноставности и веће ефикасности рада са CAPP/CAM апликацијом, препорука је да се те тачке, које се намеравају користити као  $W_i$  -тачке приликом моделирања поступка обраде, моделирају (формирају) као тзв. *datum*<sup>5</sup> тачке још у CAD апликацији или током формирања тзв. производног склопа, како би се утврђивање  $W_i$  -тачака у CAPP/CAM апликацији свело на једноставан избор тачака које су претходно формиране. Заправо, ова препорука се може проширити на све референтне геометријске ентитете који су нам потребни у CAPP/CAM апликацији приликом подешавања операције обраде. Дакле, поред  $W_i$  -тачака, то се односи и на тзв. *From Point* и *Home Point* -тачке одакле алат креће у, и враћа из захвата, затим на тачку измене алата *Tool Change Point*. Ове тачке, заправо, припадају геометрији машине и, ако већ нису дефинисане на геометријском моделу машине или радног стола, могу се формирати у односу

<sup>5</sup> *Datum points, axes, curves, plane, coordinate systems* јесу тзв. помоћни-референтни геометријски ентитети: тачке, осе, криве, равни и координатни системи.

на припремак/израдак у датој позицији и оријентацији на машини  $W_i$ . Такође, препорука је да координатни системи  $W_{i\_CSYS}$ ,  $M\_CSYS$  буду формиран на одговарајућим геометријским моделима припремка/изратка и машине (или дела машине, као што је радни сто). Коначно, поред тачака и координатних система, веома је корисно да се и одговарајуће референтне равни које се користе приликом моделирања технолошког поступка, попут тзв. безбедне или повратне равни<sup>6</sup> формирају у претходном кораку, у CAD апликацији, нпр. приликом формирања производног склопа (Слика 3-12).



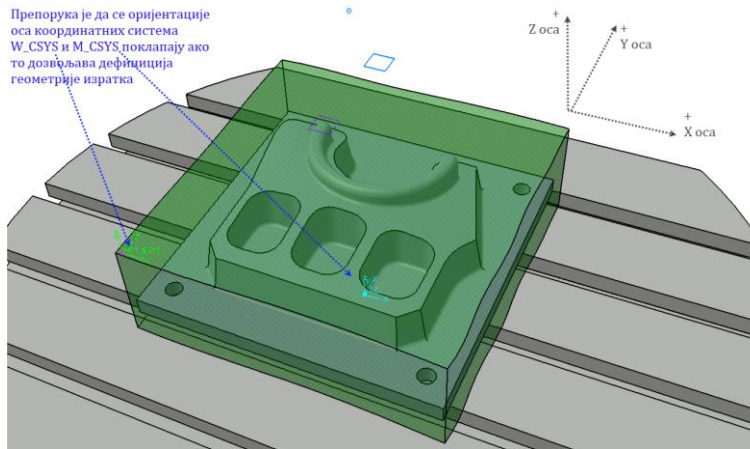
Слика 3-12 Формирање референтних тачака *Производног склопа*.

Подешавање оријентација оса координатног система изратка  $W\_CSYS$  (обратка, припремка) је такође веома важан корак у утврђивању плана стезања и оријентације изратка/обратка/припремка. Као што је то већ познато за оне коју су упознати са садржајем предмета ОАС МФН: Програмирање НУМА 1, оријентација оса координатног система изратка  $W\_CSYS$  непосредно утиче на вредности координата карактеристичних

<sup>6</sup> Раван *Retract plane* која дели простор на „радни полупростор“ и „безбедни полупростор“ у коме је безбедно да се помоћно кретање алата обавља максималном брзином, тзв. брзим ходом, а да, при томе, алат не може да „закачи“ запремину обратка или елемената стезног алата и прибора.

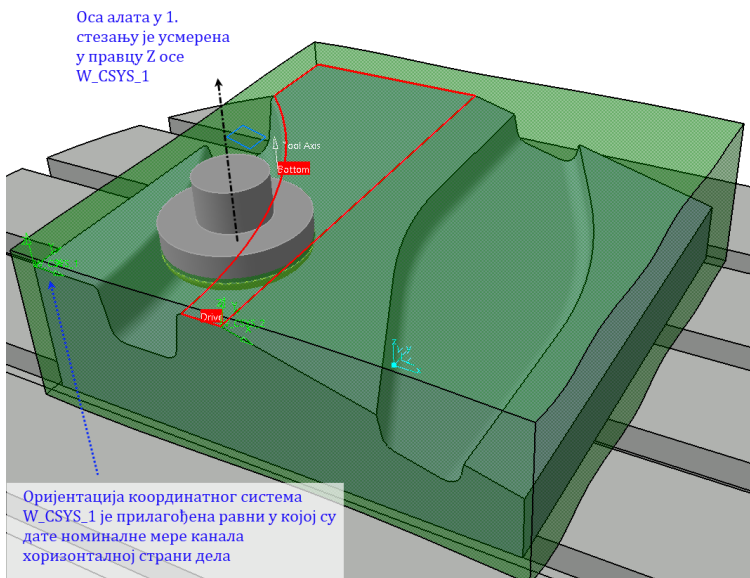


тачака путање алата и према тим координатама контролери извршних органа НУ машина, пратећи G-код, воде алат током обраде.



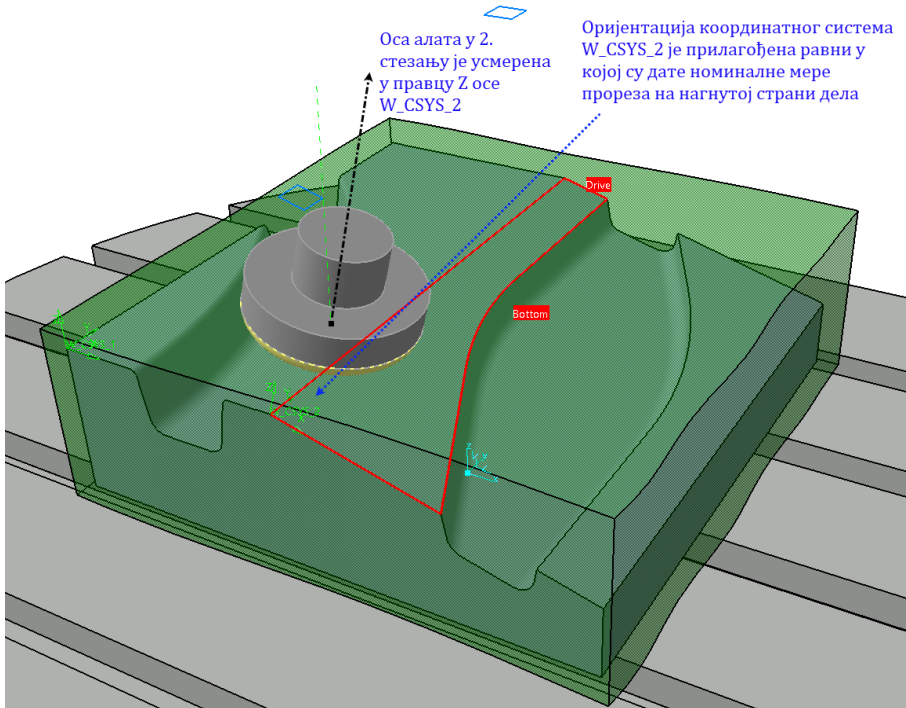
**Слика 3-13** Приказ оријентације координатног система изратка/обратка/припремка – тежи се кад год је то могуће да су оријентације оса координатног система изратка и машине исте.

У ситуацији када су номиналне мере геометријских облика на изратку дате у више равни има смисла формирати два или више координатних система изратка и спрам тих координатних система дефинисати два, односно више стезања у једној операцији (Слика 3-14, Слика 3-15).



**Слика 3-14** Прво стезање дела се одликује оријентацијом координатног система W\_CSYS\_1.

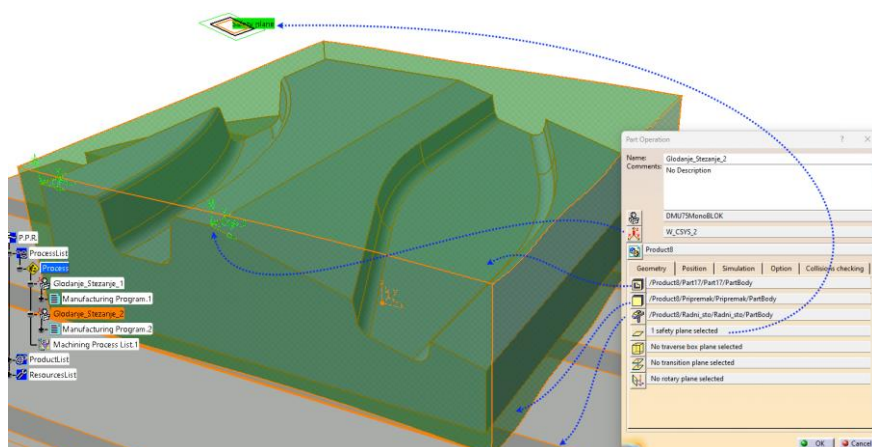
Овакав приступ је посебно повољан у случају да се располаже НУ машином (нпр. глодалицом) која није у стању да обавља синхрону 4-осну или 5-осну обраду, већ је могуће обављати синхрону 3-осну обраду с могућношћу прецизне промене оријентације обратка ротацијом око једне или две додатне осе (тзв. 4-страна или 5-страна обрада). У том случају, за свако стезање предвиђен је по један координатни систем изратка.



**Слика 3-15** Друго стезање дела се одликује оријентацијом координатног система W\_CSYS\_2.

Приликом подешавања опција у вези са операцијом обраде, обично је потребно да корисник *CAPP/CAM* апликације изабере одговарајуће елементе *производног склопа* (израдак, припремак, чланове стезног алата) и тиме, касније, омогући *CAPP/CAM* апликацији да обави одговарајућу симулацију уклањања запремине и утврди евентуалне, недозвољене колизије алата и запремине изратка или стезног прибора.

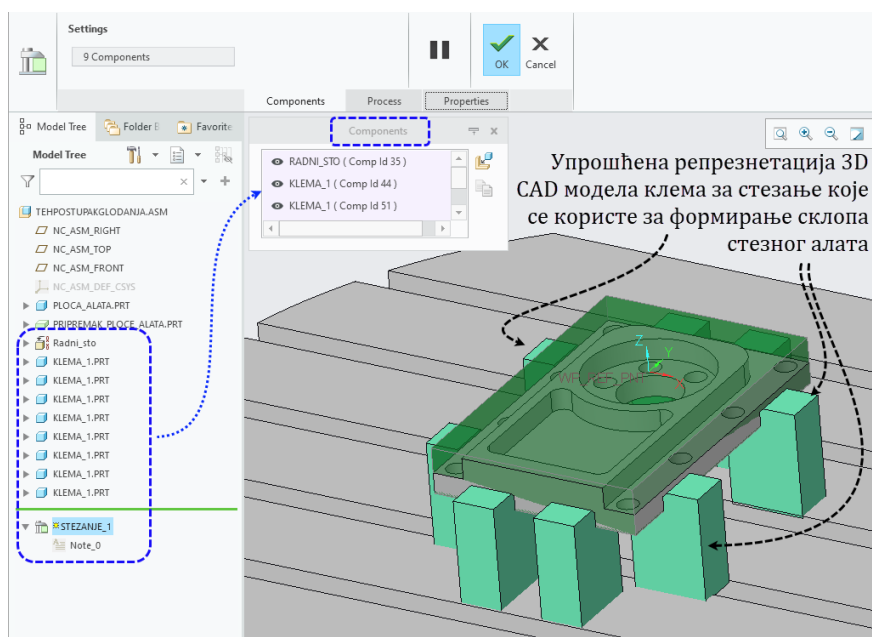




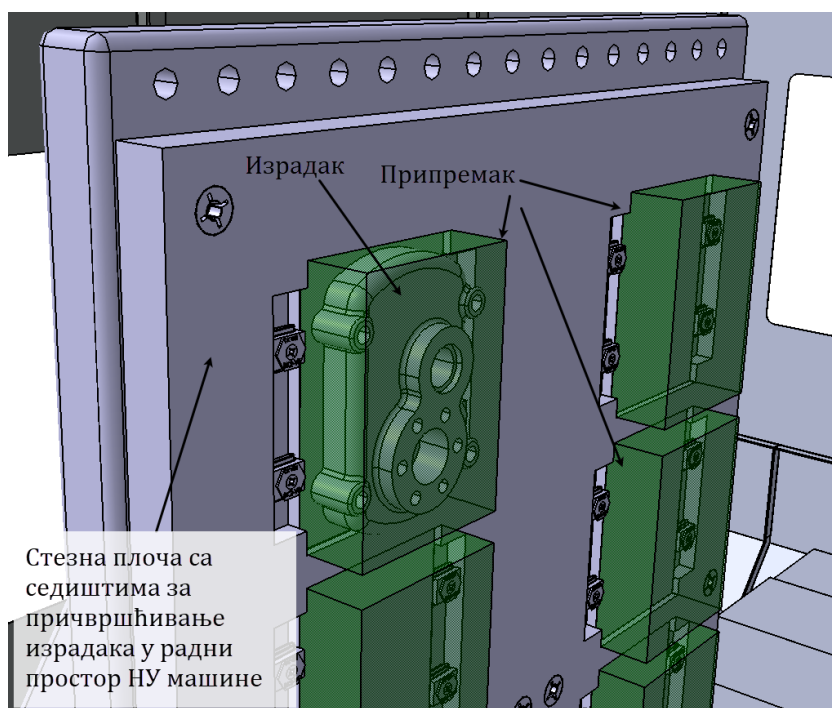
**Слика 3-16** Избор одговарајућих чланова Производног склопа, координатног система операције и додатних референтних геометријских ентитета (ограничења) која ће се користити у извршном коду.

### 3.1.2.1 Алати за причвршћивање припремка у радни простор

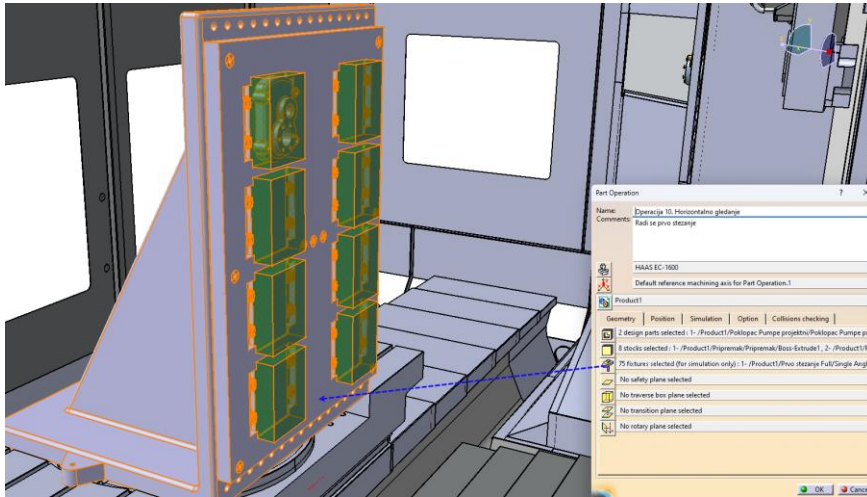
3D модели стезног алата или прибора, којима се израдак стеже у радни простор машине могу изостати из производног склопа, Међутим, као што је већ поменуто, често је веома корисно да волумен стезног алата буде присутан како би се током симулације кретања алата према програмираним путањама утврдило да ли долази до (недозвољеног) задирања обрадног алата у волумен стезног алата. Најчешће, инжењер који моделира технолошки поступак у *CAPP/CAM* апликацији, поседује већ 3D *CAD* моделе стезног алата које уобичајено користи за стезање и то су најчешће упрошћене репрезентације 3D *CAD* модела елемената стезног алата (Слика 3-17). У случају да технолошки поступак и операције у њему захтевају специјалне алате за стезање, потребно је да инжењер осмисли конструкцију склопа стезног алата и формира 3D моделе и потом их унесе у производни склоп. На сликама (Слика 3-18 и Слика 3-19) је приказан пример када је због специфичне, хоризонталне, оријентације глодалице, која је била планирана да се користи за израду одговарајућих делова и потребе за високо-продуктивном производњом, склоп стезног алата (и његови саставни делови) морао да буде најпре моделиран у складу са захтевима технолошког поступка, а потом и унет у производни склоп и декларисан као стезни прибор (*fixture*).



**Слика 3-17** Приказ корака формирања склопа стезног алата у САМ модулу Сгео PLM софтвера.

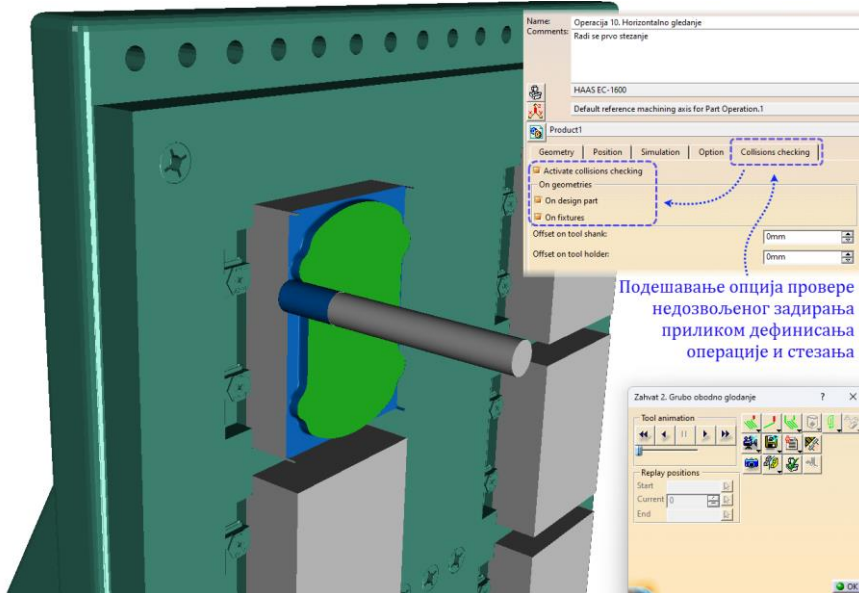


**Слика 3-18** Пример посебно моделираног склопа стезног алата који одговара плану стежања осмишљеном за одговарајући технолошки поступак.

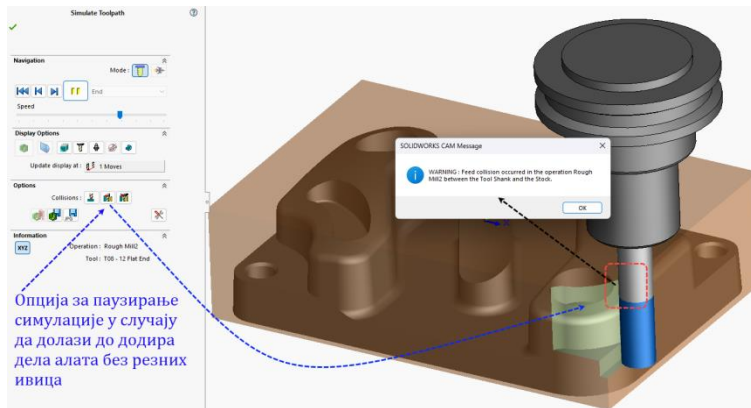


**Слика 3-19** Декларисање склопа стезног алата као опреме за причвршћивање припремака у радни простор НУ машине приликом подешавања основних елемената модела технолошког поступка.

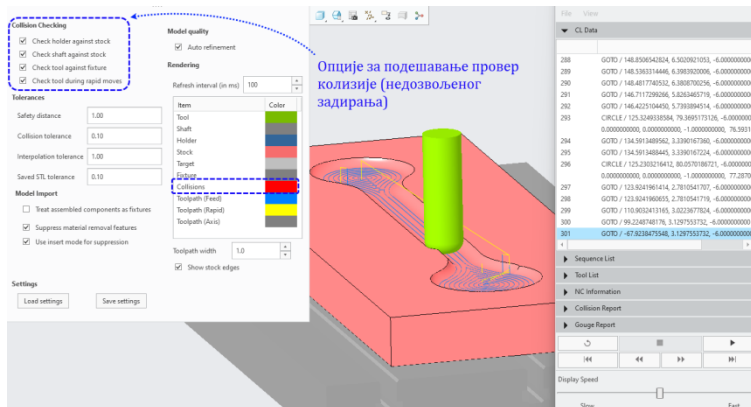
Приликом подешавања опција за утврђивања задирања алата у недозвољен простор, потребно је подесити и опције провере задирања које се односе на резни део алата и на носач алата, тзв. адаптер за стезање резног алата (Слика 3-20, Слика 3-21, Слика 3-22).



**Слика 3-20** Симулација обраде са провером недозвољеног задирања алата у запремину припремка, изратка и стезног алата у CAM модулу Catia PLM софтверу.



**Слика 3-21** Приказ симулација са утврђивањем колизије између алата и недозвољених запремина (изратка и прибора за стезање). Симулација обраде са провером задирања у CAM модулу SolidWorks PLM софтверу.

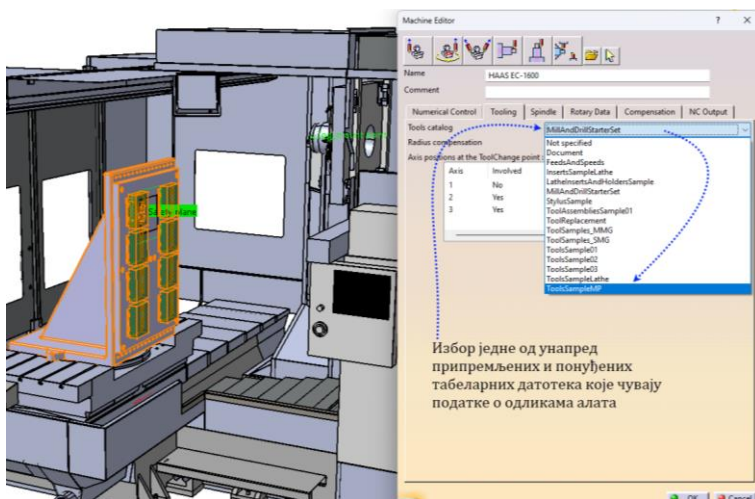


**Слика 3-22** Подешавање опција провере недозвољеног задирања алата (и адаптера) у запремину изратка, стезног прибора и припремка обавља се у оквиру подешавања опција симулације обраде у CAM модулу Creo PLM софтверу.

### 3.1.3 ПОДЕШАВАЊЕ ЗБИРКИ АЛАТА ОБРАДЕ У CAPP/CAM АПЛИКАЦИЈАМА

Приликом формирања основних елемената модела технолошког поступка и операција један од корака у низу које треба обавити је подешавање скупа алата којима ће се вршити обрада. Савремене CAPP/CAM апликације нуде већ припремљене збирке алата које корисник може да „учита“ у модел технолошког поступка. Припремљене збирке алата обично се могу наћи међу опцијама којима се врши подешавање одлика машине (Слика 3-23). У основи, те збирке алата, које су дате у форми табеларних датотека (Слика 3-24), нису обавезно укључене као опција машине која се бира, али могу бити, од стране корисника, повезане са

машином коју корисник бира, уколико је претходно извршио дефинисање одлика машине и изабрао или формирао жељену збирку алата коју је „сачувао“ као одлику почетне конфигурације машине. Овакав начин подешавања је уобичајен за радионице у којима се уз одређену машину налази одговарајући, тој машини припадајући, скуп алата. На тај начин, инжењер који моделира технолошки поступак штеди време накнадног описивања одлика алата који ће користити. Наравно, приликом моделирања конкретног технолошког поступка, односно операције, корисник може, поред почетног скупа алата, унети и алате чије одлике нису унете у почетној конфигурацији. О детаљном подешавању геометријских и технолошких одлика алата биће више речи у одговарајућим поглављима где ће бити описиван процес детаљног моделирања операција обраде резањем и деформисањем, као и процес моделирања операција израде додавањем слојева материјала.



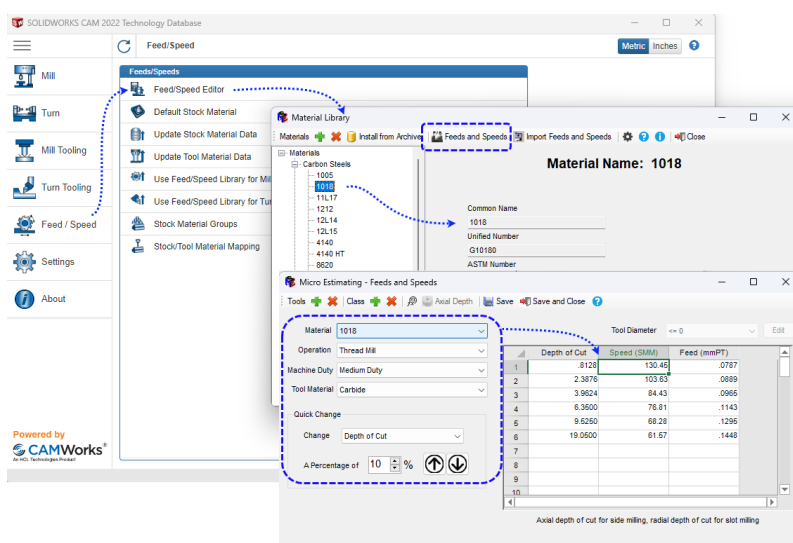
Слика 3-23 Приказ корака подешавања одлика машине када се бира почетна, већ претходно формирана, листа алата која ће се користити приликом моделирања операција обраде.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ENDCHAPTER	NC TOOLS						
2	Keywords	MFG_NAME_BAS	MFG_NAME	MFG_COMMENT	MFG_TOOL_NUMBER	MFG_NB_OF_STAGES	MFG_NOMINAL_DIAM	MFG_OVERALL_LGTH
3	Types	String	String	String	Integer	Integer	mm	mm
4		MfgEndMillTool	End Mill D 10	End Mill Tool	1		10	100
5		MfgTapTool	Tap D6	Tap Tool	2		6	100
6		MfgTapTool	Tap D8	Tap Tool	3		8	100
7		MfgTapTool	Tap D10	Tap Tool	4		10	100
8		MfgTapTool	Tap D12	Tap Tool	5		12	100
9		MfgSpotDrillTool	Spot Drill D10	Spot Drill Tool	6		10	100
10		MfgSpotDrillTool	Spot Drill D15	Spot Drill Tool	7		15	100
11		MfgCenterDrillTool	Center Drill Tool D2.5	Center Drill Tool	8		2.5	50
12		MfgDrillTool	Drill D4.5	Drill Tool	9		4.5	100
13		MfgDrillTool	Drill D6	Drill Tool	10		6	100
14		MfgDrillTool	Drill D6.5	Drill Tool	11		6.5	100
15		MfgDrillTool	Drill D8	Drill Tool	12		8	100
16		MfgDrillTool	Drill D8.5	Drill Tool	13		8.5	100
17		MfgDrillTool	Drill D10	Drill Tool	14		10	100
18		MfgDrillTool	Drill D10.5	Drill Tool	15		10.5	100

Слика 3-24 Табеларна датотека (*ToolsSampleMP.xlsx*) у којој је скуп алата са описом одлика и вредности појединих параметара који се може „учитати“ приликом конфигурисања машине.



Поред података који описују геометрију алата и одговарајућих додатака (на пример адаптера за стезање) са мање или више детаља, у овим табелама или табелама које су повезане у релационој бази података према кључним пољима могу се наћи и други параметри чије вредности, на пример, могу да описују почетне, препоручене вредности параметара обраде за дати алат, попут препоручене вредности брзине резања, дубине резања и помака (Слика 3-25). Такође, у тим повезаним табелама могу се наћи и подаци о материјалу алата, тежини алата, могућим начинима пласмана расхладне течности и сл. Заправо, поменуте табеле базе података могу садржати све оне податке који могу или треба да буду унети у извршни код како би се што ефикасније управљало НУ машином.

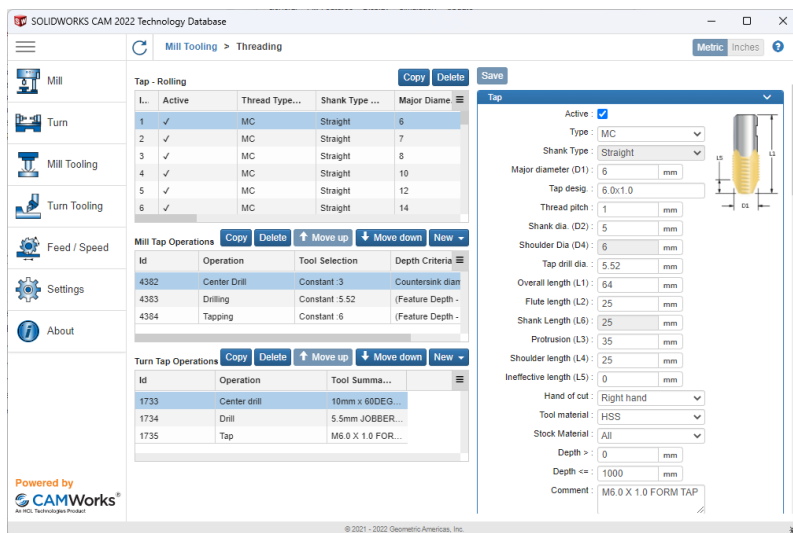


**Слика 3-25** Приказ избора препоручених режима обраде глодања (брзина резања, дубина резања и помак) за одговарајући материјал на основу изшчитаних препорука из базе података CAM модула SolidWorks PLM апликације.

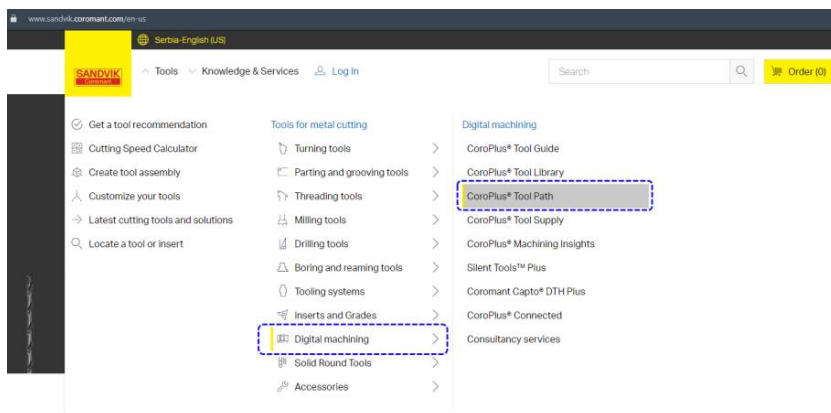
Такође, у тим већ припремљеним и, од стране произвођача CAPP/CAM апликације, уграђених база података могу се наћи и формализоване базе знање које нуде и препоруке о начинима обављања појединих операција обраде (Слика 3-26) или о путањима алата, тзв. „стратегијама”.

Све је чешће отворена могућност да се CAPP/CAM апликација повеже са базама података произвођача алата, машина, припремака и стезног прибора путем интернета. Тиме CAPP/CAM апликације постају „отвореније” и прилагодљивије тренутним радним условима корисника пружајући могућност кориснику да, непосредно, у оквиру процеса моделирања технолошког поступка, приступа базама података о алатима,

прибору и материјалима које садрже много више детаља, који заиста у том тренутку постоје на тржишту и за које могу формирати инстантни захтев за набавку. *MasterCAM*, *Autodesk Fusion360 CAM* модул и *NX CAM* модул су понудили интеграцију појединих Sandvik Coromant-ових *Digital Machining* сервиса попут *CoroPlus -Tool Library*, *-Tool Path (Prime Turning)* путем тзв. додатака (*add-in* -ова) софтвера који користе *online* базе података и базе знања Sandvik Coromant-а (Слика 3-27, Слика 3-28).

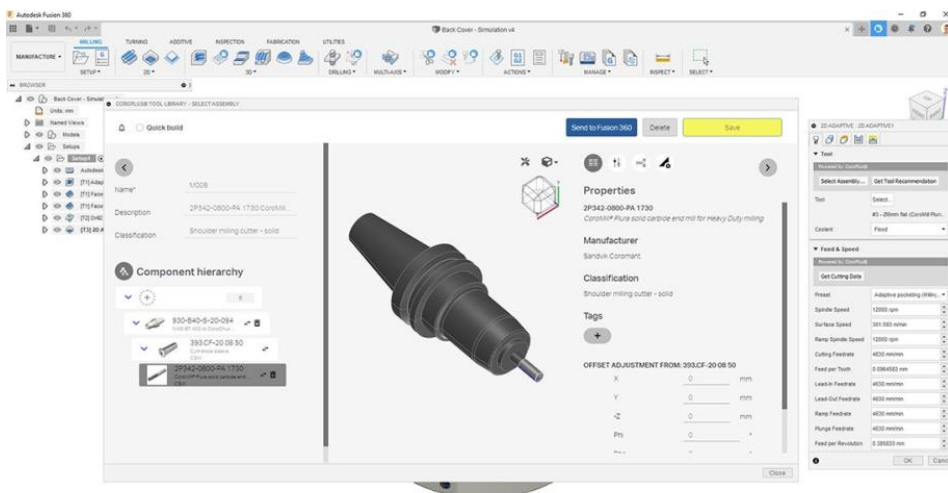


**Слика 3-26** Пример препоруке за начин израде унутрашњег навоја за случајеве операција на глодалици или стругу која обухвата редослед захвата, избор сета алата и одговарајућих режима обраде (CAM модул SolidWorks PLM апликације).



**Слика 3-27** Web портал Sandvik Coromant са тзв. *CoroPlus online* сервисима која се могу интегрисати у одговарајуће CAPP/CAM апликације као проширења.

На тај начин, ове *CAPP/CAM* апликације знатно се олакшале приступ великим базама података и знања у вези са машинском обрадом резања и омогућиле унапређење продуктивности инжењера који моделирају технолошки поступак.



Слика 3-28 Приказ коришћења CoroPlus Library сервиса који је уграђен у Fusion 360 CAM модул<sup>7</sup>.

Такође, у том контексту, треба поменути и најновији концепт *PLM* софтвера у облику интернет сервиса Onshare који је у старту осмишљен тако да буде „отворен“ за интеграцију са свим потенцијалним додацима кроз интернет сервисе укључујући и *CAPP/CAM* апликације и одговарајуће базе података и базе знања.

## 3.2 МОДЕЛИРАЊЕ ЗАХВАТА ОБРАДЕ (РЕЗАЊЕМ)

Детаљно моделирање „технолошких“ операција НУ машина у *CAPP/CAM* апликацијама се може интерпретирати и као моделирање захвата машинске обраде<sup>8</sup>. Може се уочити да је поступак моделирања захвата у различитим *CAPP/CAM* апликацијама, које примењују тзв. *хибридни приступ*, веома сличан. Моделирање захвата започиње избором одговарајуће варијанте захвата од стране инжењера из збирке унапред

<sup>7</sup> [https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/campaigns/autodesk-digital-machining-partner?utm\\_medium=referral&utm\\_source=partner&utm\\_campaign=knowledge-based-planning](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/campaigns/autodesk-digital-machining-partner?utm_medium=referral&utm_source=partner&utm_campaign=knowledge-based-planning)

<sup>8</sup> У Срео-у се јасно прави разлика између операција и захвата обраде и ту се захвати називају *секвенцама* (*NC sequence*), што није случај код већине других *CAPP/CAM* апликација.



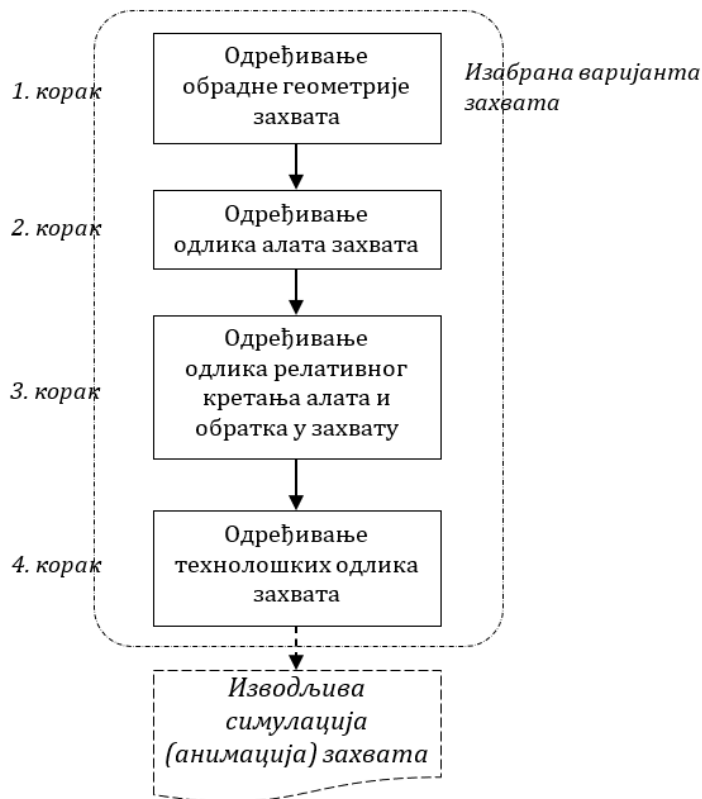
припремљених варијанти захвата, који су за дати контекст обраде могући и прикладни. Након избора одговарајуће варијанте захвата, одређивање одлика тог захвата се изводи у четири корака, који су скоро незаобилазни за сваку примену и контекст обраде (Слика 3-29). Најпре, треба одредити геометрију која се обрађује<sup>9</sup> или израђује, а затим се одређује алат којим ће се спроводити захват. Следи одређивање одлика релативног кретања алата и обратка и, коначно, одређивање тзв. технолошких одлика захвата. У *CAPP/CAM* апликацијама које су намењене моделирању тзв. неконвенционалних поступака обраде или израде делова, технолошке одлике обраде се разликују у зависности од врсте поступка. На пример, то могу бити температура материјала који се наноси у слојевима или вредност електричне струје и напона код електро-ерозионе обраде, фреквенција осцилација алата код ултра-звучне обраде или трајање ласерског импулса код сечења ласером и др. Технолошке одлике код захвата обраде резањем су, заправо, истовремено и одлике релативног кретања алата и обратка – брзина резања, дубина резања и помак. Резултат моделирања захвата се огледа у симулацији или анимацији захвата која се може извести. Међутим, треба имати на уму да *изводљивост анимације захвата* не значи обавезно да је захват ваљано моделиран. Изводљивост анимације захвата је само потврда да током моделирања захвата није направљена нека грубља грешка (у избору одлика захвата или уносу вредности за поједине параметре) која би „онемогућила” *CAPP/CAM* апликацију да изведе анимацију. Ваљаност (квалитет) моделираног захвата се одређује на основу степена остварености тзв. кључних показатеља учинка захвата. Изабрани скуп кључних показатеља учинка захвата може бити веома разноврстан и, у општем случају, он зависи од контекста обраде. Један од најчешћих и најједноставнијих показатеља учинка (те и ваљаности) захвата код грубе обраде резањем је брзина уклањања запремине материјала припремка. Што је та брзина већа, продуктивност захвата је већа, захват је боље, квалитетније, моделиран. Наравно, приликом спровођења захвата грубе обраде резањем, не сме доћи до недозвољеног задирања алата у материјал изратка или запремину стезног алата и додатног прибора и да снага машине не прелази дозвољену границу. Код захвата фине обраде резањем, брзина уклањања запремине материјала припремка је, такође, један од кључних показатеља учинка, али је додатни незаобилазни показатељ учинка и величина одступања геометрије обратка/изратка од референтне геометрије (у

---

<sup>9</sup> Код *CAPP/CAM* апликација намењених захватима обраде резањем обрадна геометрија је, заправо, запремина која се намерава уклонити тим захватом.

односу на референтни CAD модел изратка). Што пре моделирани захват „доведе” обрадак до циљаног облика са минималним одступањем у односу на референту геометрију, то је захват фине обраде резањем боље, квалитетније моделиран.

0. корак – избор варијанте захвата



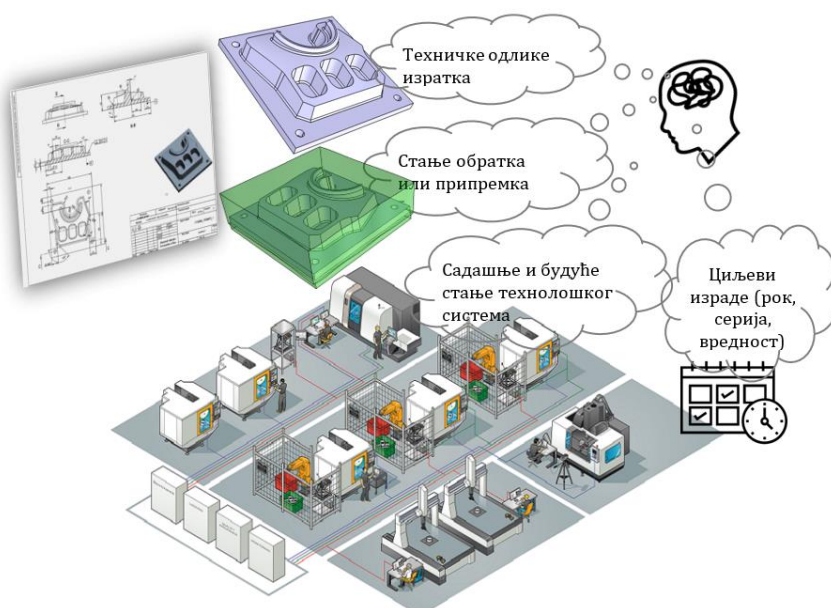
Слика 3-29 Општи алгоритам моделирања захвата

### 3.2.1 МОДЕЛИРАЊЕ ЗАХВАТА ОБРАДЕ ГЛОДАЊЕМ<sup>10</sup>

Моделирање захвата обраде глодањем започиње избором варијанте захвата која је „прикладна за дати контекст обраде”. Пре него појаснимо шта *прикладност захвата за дати контекст обраде* значи, треба разјаснити шта *контекст обраде* подразумева. У суштини, (дати или тренутни) *контекст обраде* се односи на све оне податке и информације

<sup>10</sup> Моделирање операција глодања је у књизи приказано углавном уз коришћење CAPP/CAM модула Catia, SolidWorks и Creo PLM система. Иако су Catia и SolidWorks софтвери у власништву исте компаније (Dassault Systemes), интерфејс ова два CAPP/CAM модула се доста разликује.

које инжењер има у вези са техничким одликама изратка, тренутним стањем обраде обратка/припремка, затим тренутним и будућим стањем технолошког система у коме се израдак треба изградити и, коначно, циљевима израде изратка (Слика 3-30). Инжењер, у реалном времену, настоји да семантички интерпретира дати контекст обраде што је могуће свеобухватније и покушава осмислити следећи захват обраде. У томе се помаже рачунарском *CAPP/CAM* апликацијом, бирајући из њене збирке унапред припремљених варијанти захвата ону варијанту која му се учини *најприкладнијим* датом контексту, односно онај захват који је целисходан спрема свих релевантних информација о обради изратка којима располаже у том тренутку.

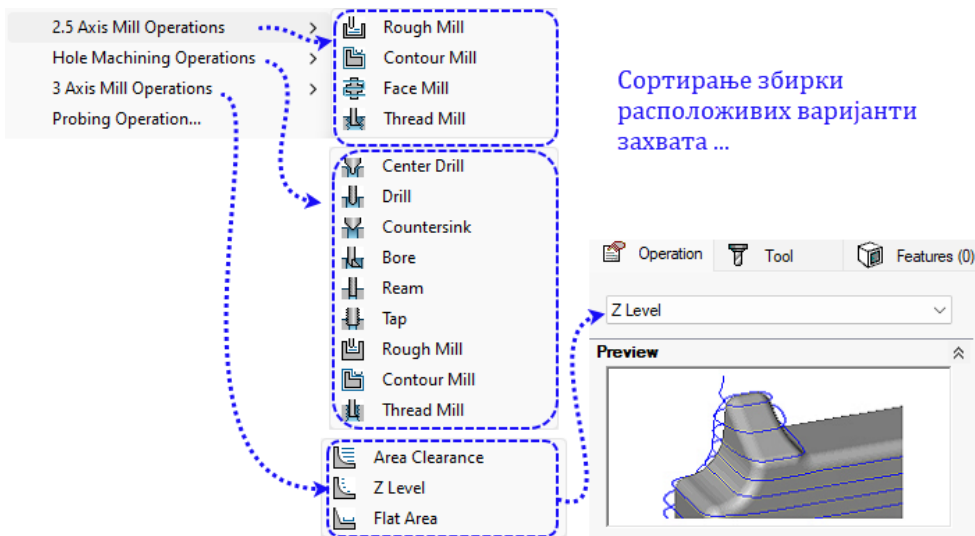


**Слика 3-30** Тренутни контекст обраде који инжењер мора да разуме како би осмислио целисходан технолошки поступак, операцију и захват обраде.

Имајући у виду или, макар, наслућујући сложеност семантичке интерпретације ситуације датог контекста обраде, јасно је због чега је веома тешко створити генеративни *CAPP/CAM* апликацију која треба да обави то самостално, а потом и изабере целисходан захват. За сада, чак и веома напредне методе вештачке интелигенције нису у стању да обављају тај задатак ни близу тако ефикасно као човек.

Збирка припремљених, односно расположивих варијанти захвата непосредно указује на могућности *CAPP/CAM* апликације. Што је збирка већа, и могућности за проналажење одговарајуће варијанте захвата

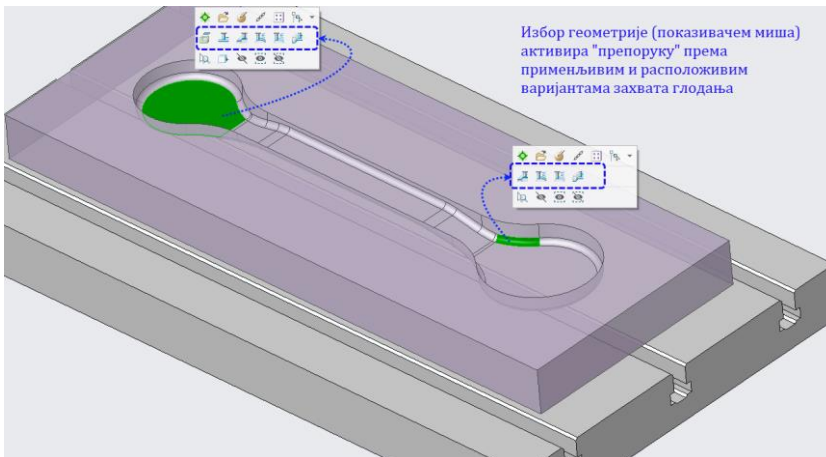
спрам датог контекста обраде су веће. Како број расположивих варијанти захвата може бити велики и, самим тим кориснику *CAPP/CAM* апликације теже да претражује, обично се број понуђених варијанти захвата ограничава према врсти НУ машине која је изабрана. Тако, на пример, ако је изабрана 3-осна НУ глодалица, само варијанте захвата глодања који се могу обавити на њој (имајући у виду ограничење релативног кретања алата и припремка на таквој машини) нуде се као расположиве (Слика 3-31). Ако је изабрана 5-осна глодалица, скуп расположивих варијанти захвата ће бити знатно проширен (Слика 3-32).



**Слика 3-31** Расположиве варијанте захвата глодања на 3-осној глодалици (*CAM* модул, SolidWorks PLM).

Начин на који су сортиране све припремљене варијанте захвата зависи од опредељења тима задуженог за спецификацију интерфејса *CAPP/CAM* апликације. Најчешће се примењује приступ сортирања према апликацији обраде, односно према облицима који се добијају том варијантом глодања или према врсти путање глодала током обраде. Само груписање варијанти захвата може бити експлицитно, односно све расположиве варијанте су непосредно видљиве (Слика 3-32, Слика 3-31), а може бити и имплицитно, што значи да су неке варијанте захвата „сакривене” у виду неке од под-варијанти непосредно понуђене варијанте захвата (Слика 3-33). У основи, тежи се што интуитивнијем интерфејсу како би се тиме помогло кориснику софтвера да буде продуктивнији.





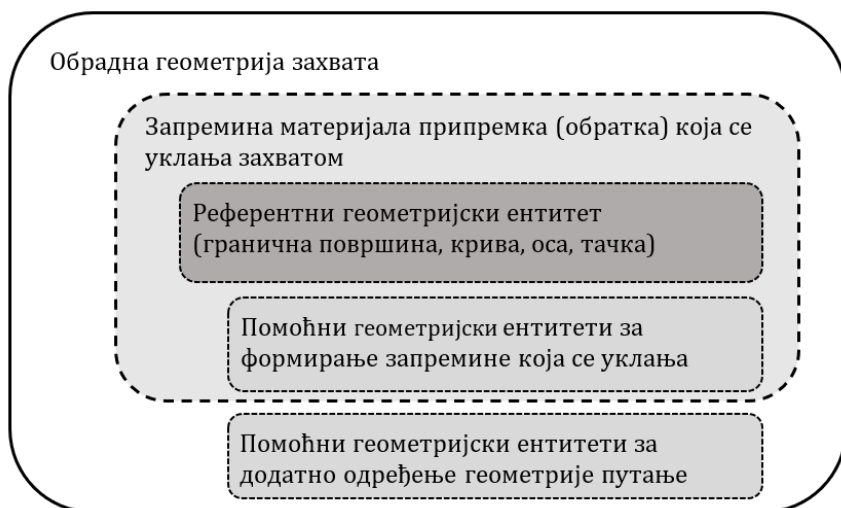
**Слика 3-34** Избор прикладне варијанте захвата из листе применљивих предло-  
жене у контексту изабране геометрије (*контекстуални предлог*).

Након што инжењер изабере одговарајућу варијанту захвата глодања, *CAPP/CAM* апликација га „уводи“ у поступак моделирања захвата путем подешавања његових одлика. Уобичајено је (и логично) да се у интерфејсу апликације сродне одлике захвата групишу у неколико издвојених група одлика, па тако, најчешће, имамо групе одлика које се тичу површине која се обрађује и свих, за формирање захвата, релевантних геометријских ентитета, затим група одлика у вези са алатом који ће се користити, група одлика којима се дефинише путање алата у захвату и, на крају, обично постоји и група одлика којима се дефинишу технолошке одлике захвата. Иако интерфејси различитих *CAPP/CAM* апликација приказују опције за подешавања ових одлика на другачије начине, ипак је могуће препознати велике сличности како у распореду, тако и у опцијама које се нуде у свим варијантама интерфејса.

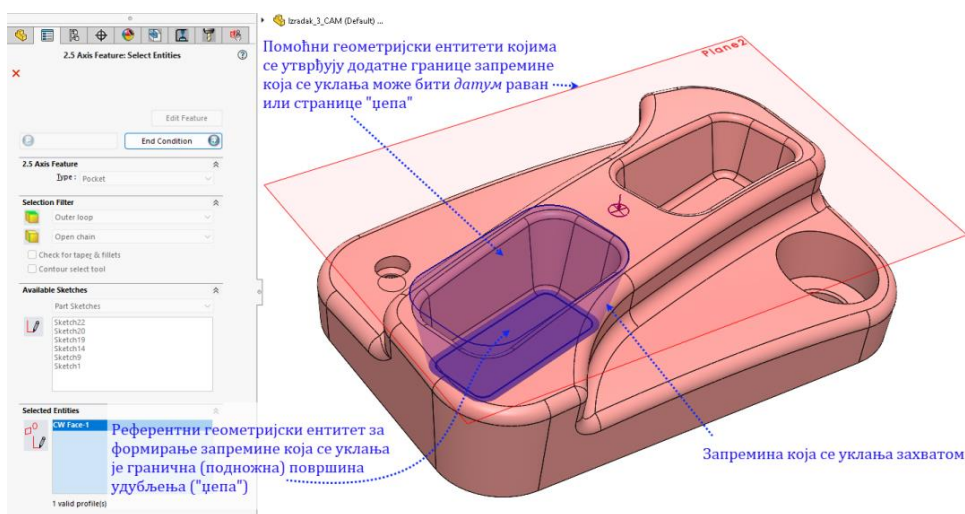
### 3.2.1.1 Одлике обрадне геометрије захвата

Одређивање одлика тзв. *обрадне геометрије* скоро се по правилу обавља пре других елемената модела захвата. Обрадна геометрија код захвата глодања се састоји из *запремине материјала припремка, односно обратка који треба уклонити* (у том захвату) и *помоћних геометријских ентитета* који могу да послуже као додатна ограничења којима се формира запремина која се уклања захватом или као додатне геометријске референце које се користе при стварању путање алата у захвату (Слика 3-35). Треба приметити да је запремина која се уклања захватом глодања обично сложена запремина, која је, веома ретко, једнозначно повезана са једном геометријско-техничком формом (*CAD feature*-ом) којом је „грађена“ геометрија референтног дела (изратка). Много чешћи случај је да се

запремина која се уклања захватом састоји из више геометријско-техничких форми, односно, од делова два или више *CAD feature*-а. Запремина која се уклања захватом се формира помоћу посебно припремљених алата *CAPP/CAM* апликације којима се одређују границе те запремине помоћу тзв. референтног геометријског ентитета (или више њих). За *референтне геометријске ентитете запремине која се уклања* најчешће се користе граничне површине или контурне криве (ивице) запремине која се уклања (Слика 3-35 и Слика 3-36).



Слика 3-35 Дијаграм структуре обрадне геометрије захвата.

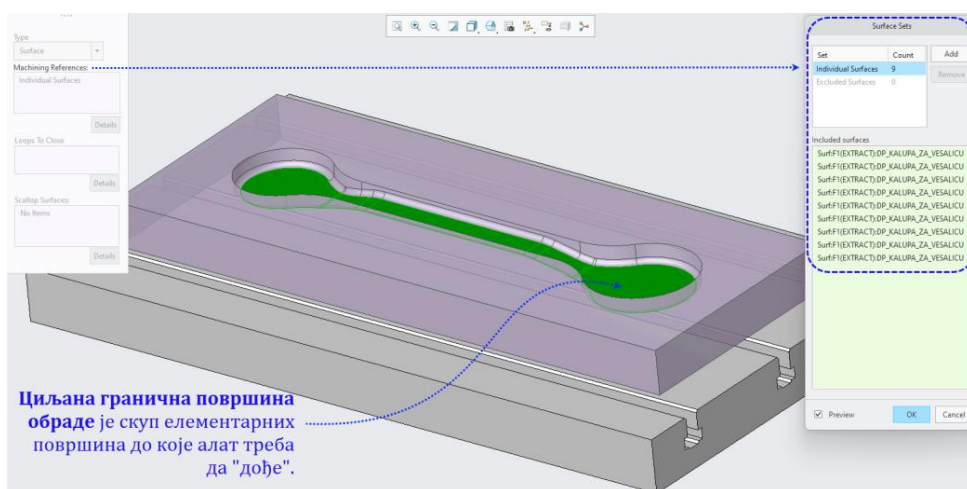


Слика 3-36 Запремина која се уклања захватом и њени референтни и помоћни геометријски ентитети.



Гранична површина или циљана<sup>11</sup> гранична површина обраде је она (гранична) површина *запремине која се уклања до које алат треба стићи* приликом уклањања запремине у завршним пролазима захвата. Додатне границе *запремине која се уклања у захвату* се формирају избором одговарајућих помоћних геометријских ентитета. Ти помоћни геометријски ентитети могу бити граничне поли-линије или скуп граничних кривих, помоћне референтне равни, осе и тачке.

Циљана гранична површина не мора да буде једна површина на CAD моделу издатка, што се у пракси најчешће и не дешава. Она се обично мора формирати избором више мањих или већих површина CAD модела издатка које се, потом, обједињују и тако обједињене, декларишу у референтни геометријски ентитет запремине која се уклања захватом (Слика 3-37).



**Слика 3-37** Формирање граничне површине обједињавањем више површина са CAD модела.

Поред *циљане граничне површине*, алати *CAPP/CAM* апликација дозвољавају да се користе и други референтни геометријски ентитети за формирање запремина која се уклања.

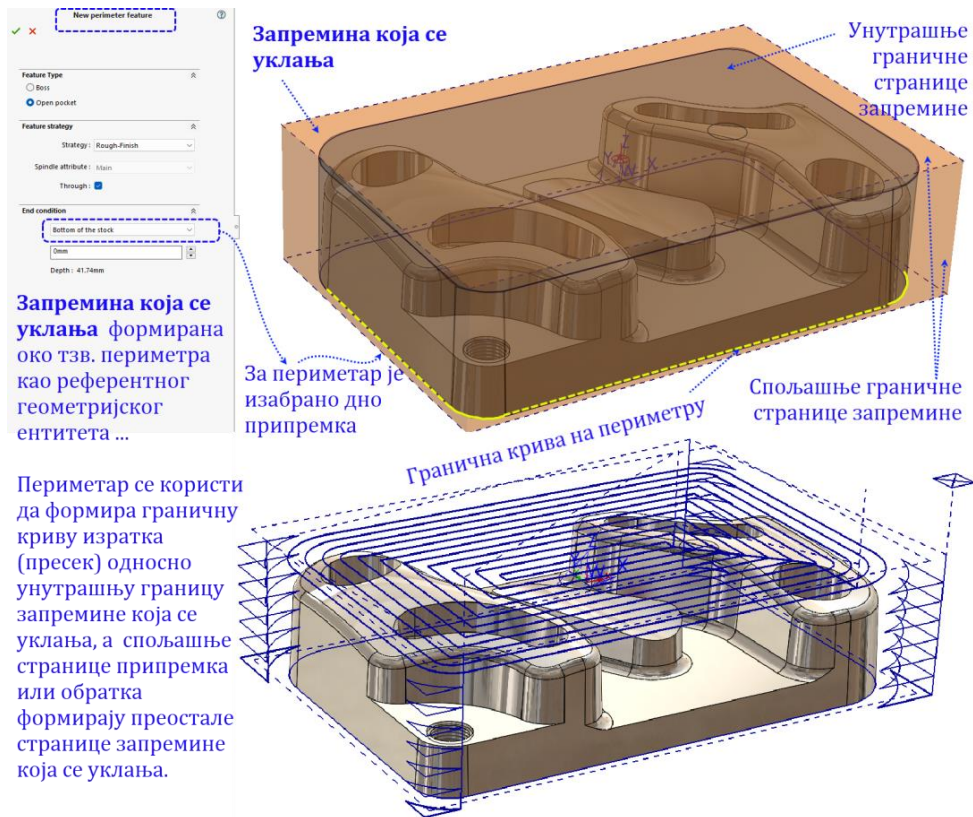
Пример за то је коришћење тзв. периметра<sup>12</sup> који је у овом случају гранична, обимна крива (полилинија) издатка која се формира на дубини до које треба формирати запремину која се уклања, односно до које

<sup>11</sup> Атрибут „циљана”, у одредници *гранична површина*, додат је како би се истакло да се ради о површини која се „циља” алатом, односно до које алат треба да „дође” у последњим пролазима захвата (она не мора да буде „подножна”).

<sup>12</sup> Периметар (грч. *περίμετρος*, *περί-* око, *μετρος*-мера) обим, а у одговарајућем контексту може означавати опсег, досег, обухват, границу до које ...



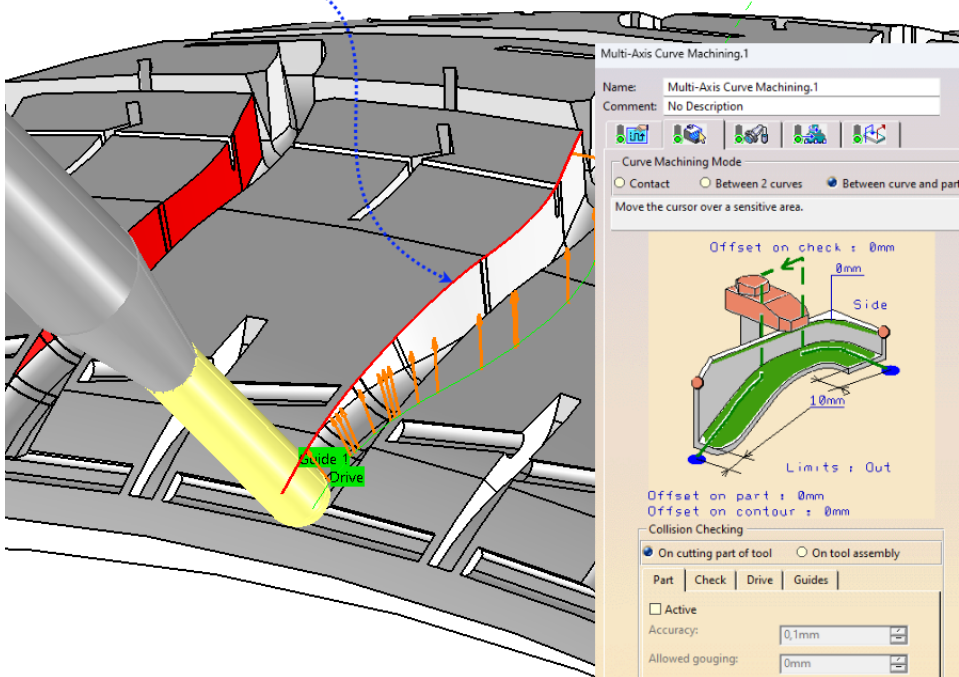
треба да досегне алат (у завршним пролазима). Пример коришћења периметра је приказан на слици (Слика 3-38).



**Слика 3-38** Формирање запремине која се уклања захватом глодања на основу обимне криве/полилиније изратка и страна припремка као спољашњих граница запремине.

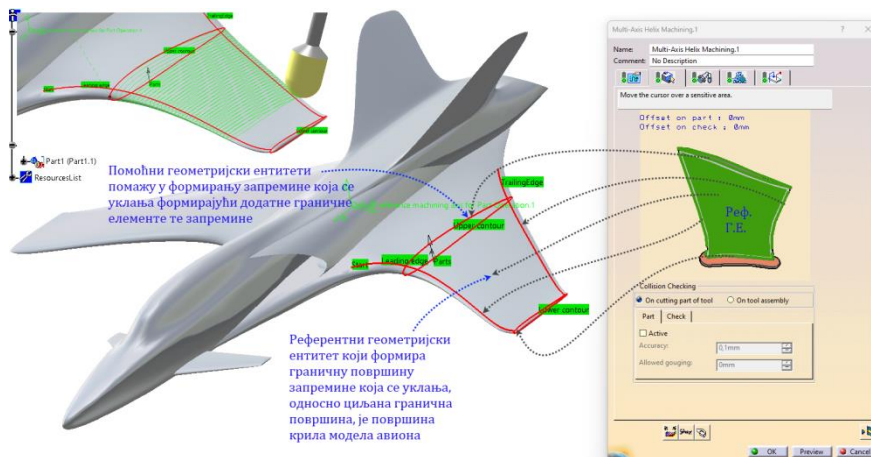
За варијанту захвата глодања по експлицитно одређеној путањи, када је референтни геометријски 2D или 3D крива, линија или полилинија, *запремина која се уклања* се не утврђује њеним граничним површинама, већ је довољно да се изабере циљана путања коју алат треба да „прати”, а сама запремина материјала који се уклања захватом „формира” се превлачењем профила алата (глодала) по тој кривој (Слика 3-39).

Референтна геометрија која одређује запремину која ће се уклонити у захвату је 3D крива (из више сегмената)



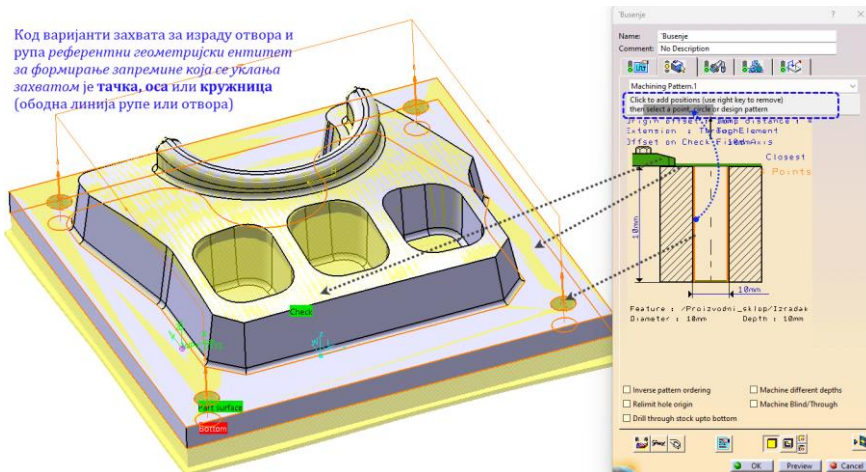
**Слика 3-39** Пример формирања запремине која се уклања захватом глодања на основу путање. Референтни геометријски ентитет је 3D крива, а помоћни геометријски ентитет површина дела која ће се искористити за додатно ограничење запремине и оријентацију осе алата током кретања по путањи.

Још један у низу специфичних случајева за формирање обрадне геометрије уочавамо приликом моделирања захвата fine обраде облика налик лопатици турбинског кола, када је потребно да глодало обилази око циљане референтне граничне површине запремине, пратећи хеликоидну завојницу (Слика 3-40). Референтна гранична површина је затворена обвојна површина изратка. Помоћни геометријски ентитети су ивице које додатно ограничавају и дају оријентацију граничној површини. Посредно, ови помоћни геометријски ентитети утичу на формирање путање алата, одређујући оријентацију осе алата у захвату, односно док „обилази“ циљану референтну површину пратећи хеликоидну завојницу.



**Слика 3-40** Формирање запремине која се уклања захватом одређивањем затворене обвојне површине издатка.

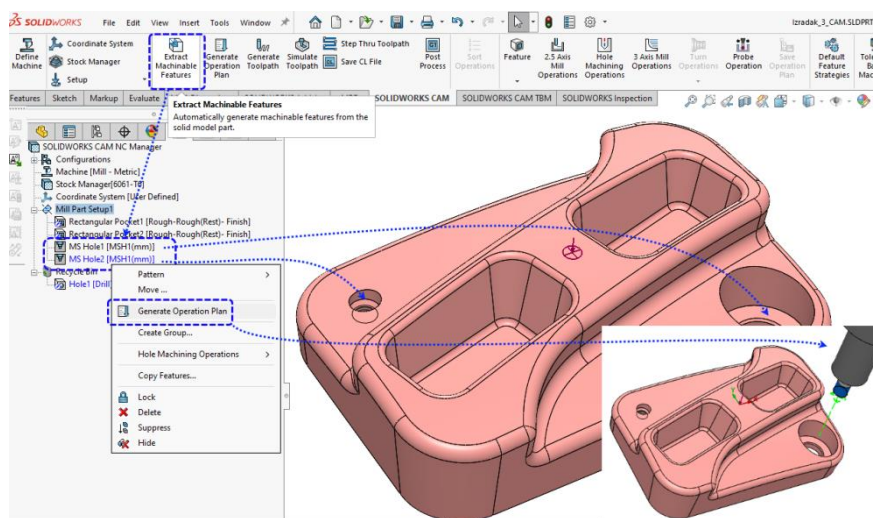
Варијанте захвата из класе захвата за израду отвора и рупа (укључујући и све друге захвате, где се алат током обраде „води“ осом, односно креће искључиво транслаторно по оси), за референтни геометријски ентитет којим се формира запремина захвата, користе различите опције у зависности од *CAPP/CAM* апликације (Слика 3-41).



**Слика 3-41** У *CAM* модулу *Catia PLM* референтни геометријски ентитет за формирање запремине која се уклања захватом за израду отвора или рупа су ободна кружна ивица отвора или рупе на *CAD* моделу издатка или тачка у њеном центру.

Оно што је карактеристично за ову класу захвата (израда отвора и рупа) је да је релативно лако могуће повезати један *CAD feature* са једним захватом, што се и користи за аутоматизовано грађење запремине која се уклања захватом помоћу тзв. *feature recognition* и *feature extraction* (Слика

3-42, Слика 3-41). Такође, ова класа захвата је погодна за аутоматско грађење захвата обраде јер је могуће применити алгоритме са уграђеном логиком за семантичком интерпретацијом *CAD* feature-a у контексту технолошког поступка за његову израду, а, потом, и за аутоматизацију избора најприкладније варијанте захвата или серије захвата (нпр. забушивање, бушење и развртање) за дату техничку форму из збирке унапред припремљених, кориснички-дефинисаних, стандардних захвата.



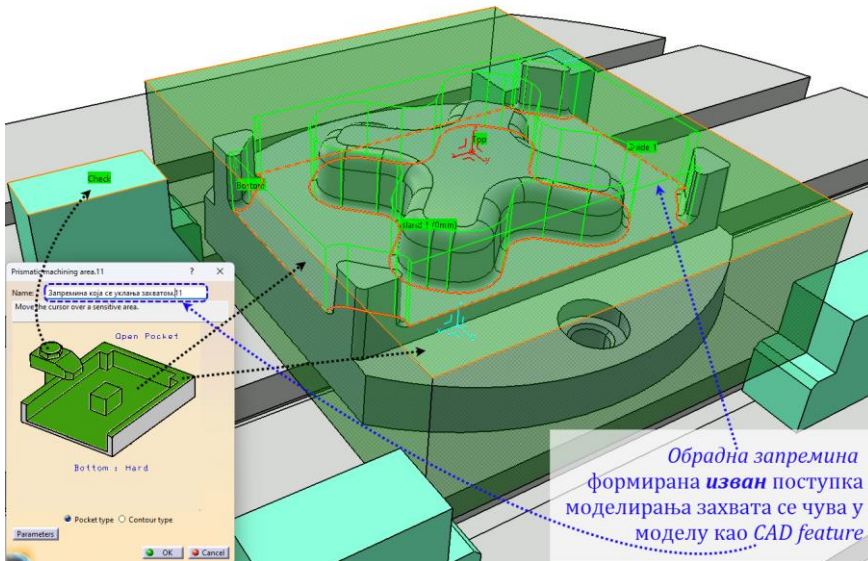
**Слика 3-42** Пример формирања обрадне геометрије рупа и отвора уз помоћ аутоматизованог препознавања и издвајања техничких елемената рупа и отвора на *CAD* моделу. Уједно, могуће је аутоматизовати формирање низа захвата потребних за израду рупе, односно отвора.

Као што је било приказано у претходним примерима, поред циљаног референтног геометријског ентитета (површина, путања, оса или тачка) којим се непосредно одређује референтна гранична површина запремине која се уклања захватом, приликом одређивања тзв. обрадне геометрије потребно је да се изаберу и тзв. помоћни геометријски ентитети. У зависности од варијанте захвата која је изабрана, *CAPP/CAM* апликација нуди могућност избора одговарајућих помоћних геометријских ентитета као и опција у вези са њима. На слици (Слика 3-43) приказан је корак дефинисања обрадне геометрије за уобичајену варијанту захвата грубог запреминског глодања. Да би се „комплетирао” скуп помоћних геометријских ентитета који ће прецизније одредити запремину која се уклања, потребно је изабрати са модела и остале помоћне геометријске ентитете. Неки од тих ентитета су неопходни да би моделирани захват био „изводљив”, односно да би *CAPP/CAM* апликација била у стању





3-45). Типичан пример за то су запремине које се уклањају захватима у којима се алат креће транслаторно по оси (израда рупа и отвора) или за серију захвата запреминског глодања (груба обрада, груба обрада заосталог материјала и фина обрада).



Слика 3-44 Формирање обрадне запремине као посебног CAD feature-а.

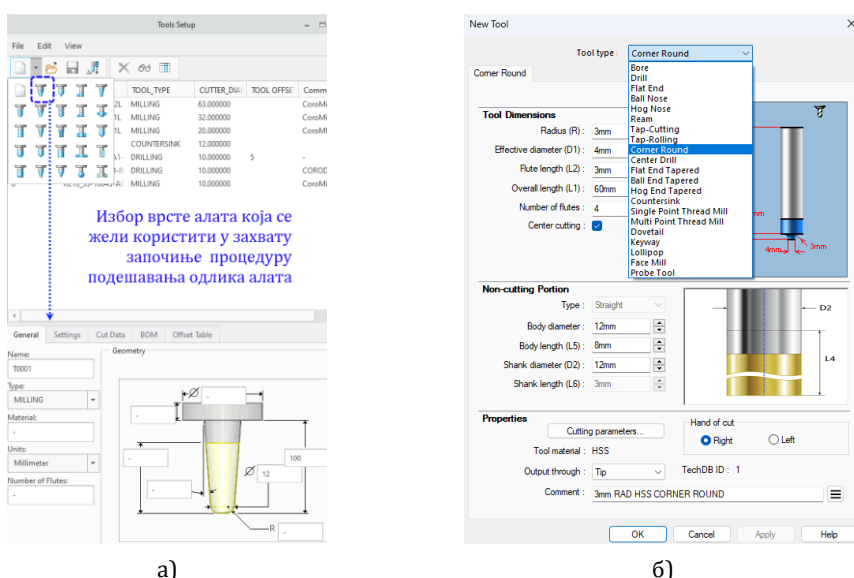


Слика 3-45 Приказ примене претходно формиране обрадне запремине приликом моделирања захвата.

### 3.2.1.2 Одлике алата

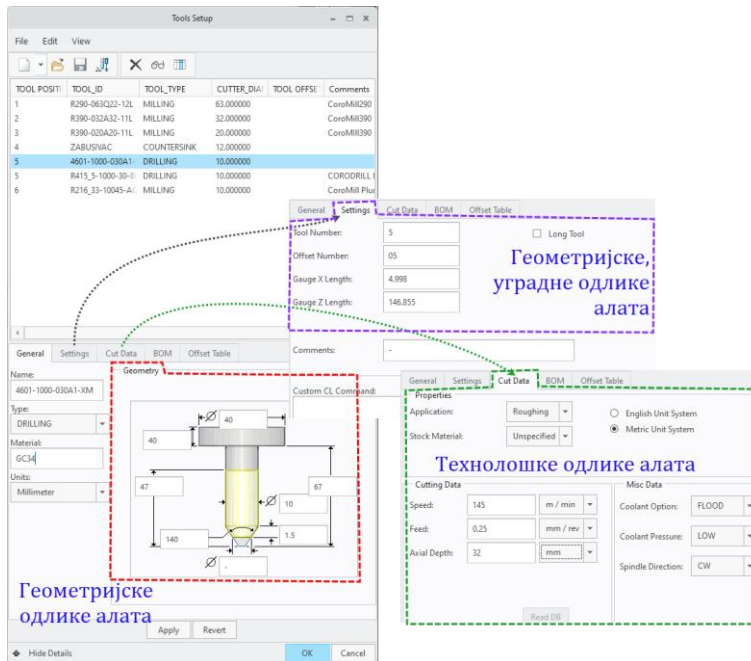
Одређивање одлика алата којим ће се вршити захват обично се обавља након формирања обрадне геометрије модела захвата. У CAPP/CAM апликацијама, као и у савременим CAM апликацијама које се инсталирају на управљачким јединицама НУ машина (Fanuc, Sinumerik, Haidenhain и др.) и које непосредно управљају НУ машинама, могуће је

моделирати алат којим се обављају захвати обраде. Заправо, приликом моделирања операција и захвата обраде, потребно је формирати дигитални модел алата, који ће бити део сложеног модела захвата, операције и поступка обраде. Моделирање алата започиње избором врсте алата из збирке припремљених врста алата које нуди *CAPP/CAM* апликација (Слика 3-46). Понуда могућих врста алата може бити сужена спрам контекста обраде, односно, у зависности од изабраног захвата обраде који се моделира (нпр. *CAM* модул *Catia PLM* софтвера). Након што се изабере врста алата, која се жели користити у захвату, започиње процедура избора опција и уноса вредности параметара који су припремљени и дозвољени за измену, односно подешавање одлика алата.



Слика 3-46 Избор врсте алата као почетни корак у моделирању алата (а) *CAM* модул *Creo PLM*, (б) *CAM* модул *SolidWorks PLM*.

Заправо, модел алата је изграђен претежно на подацима који су у вези са одређеним одликама стварног алата релевантног за спровођење захвата обраде. Да би се кориснику *CAPP/CAM* апликације олакшало одређивање или подешавање одлика алата, подаци о одликама алата су обично груписани у више сродних скупова. Дизајнери интерфејса *CAPP/CAM* апликација одлучују о томе на који начин ће бити обављено груписање. У основи, постоје две сродне групе одлика алата и одговарајућих података. То су геометријске и технолошке одлике алата (Слика 3-47).



Слика 3-47 Приказ подешавања одлика алата у CAM модулу Creo PLM.

1. **Геометријске одлике алата**, односно подаци који их описују се могу поделити у три подскупа:

- подскуп података који описују „основне” геометријске одлике алата и који су неопходни да се формира *обрадна геометрија алата* која се потом користи за формирање и анализу запремине која се уклања његовим кретањем (Слика 3-48);
- подскуп података који описују „уградне” геометријске одлике алата које су у непосредној зависности од инсталације на НУ машини. То су одстојања или тзв. *компензације* карактеристичних ободних тачака профила обртног алата у односу на референтну тачку стезања алата (тзв. тачку  $T$ ) дата у одговарајућим правцима<sup>13</sup>. За стварање исправног

<sup>13</sup> На пример, код глодалица чије је главно вретено усмерено у правцу Z осе, то су тзв. *компензација полупречника обртног алата*, односно нормално одстојање ободног профила резног дела алата од осе главног вретена, тј. од тачке  $T$  која лежи на оси главног вретена:  $dX^{(T)}_{\text{обода\_алата}} = dY^{(T)}_{\text{врха\_алата}}$ , и *компензација дужине обртног алата*, односно одстојање врха резног дела алата од тачке  $T$  исказано у правцу Z осе:  $dZ^{(T)}_{\text{врха\_алата}}$ . Треба имати на уму да максимално одстојање врха резног дела обртног алата у правцу Z осе не мора обавезно да лежи на оси главног вретена, односно алата (пример је проширивач са једном резном ивицом по ободу).



извршног кода неопходно је да ови подаци буду унети. У ове податке спадају и ознаке тачака које ће бити референциране приликом стварања извршног кода (нпр. да ли ће то бити врх алата или нека друга карактеристична тачка - Слика 3-50);

- в) подскуп података који описују „додатне” геометријске одлике алата и који нису неопходни да буду унети, али који, ако су дати, омогућавају детаљнију анализу и симулацију захвата обраде. (на пример, у податке из овог подскупа спадају вредности грудних углова, тзв. ефективних пречника глодала, дужина резне ивице и сл.).

2. **Технолошке одлике алата**, односно подаци који их описују могу се поделити, такође, у три подскупа:

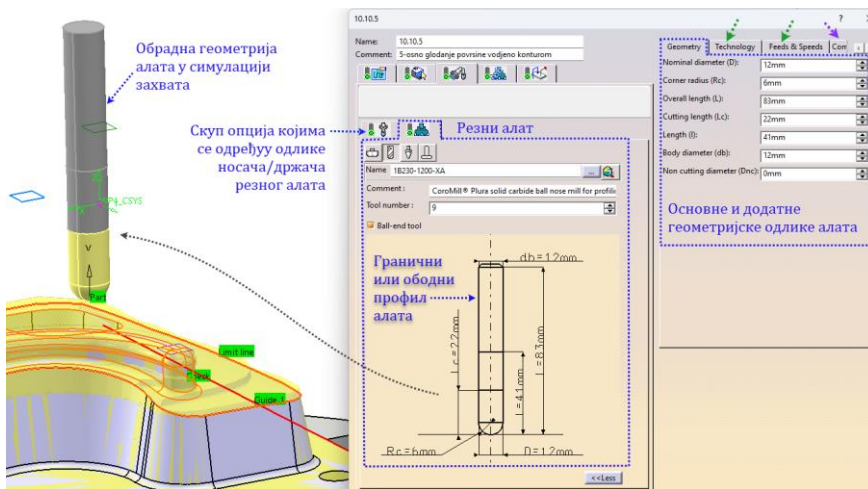
- а) подаци који описују „основне” технолошке одлике алата као што су препоручене вредности режима обраде са алатом (брзина и дубина резања<sup>14</sup> и помак). Такође, ако се ради о глодалу, у основне технолошке одлике спадају и број и оријентација резних ивица (да ли је глодало деснорезо или леворезо, јер од тога зависи да ли ће у извршном коду бити формирана наредба за погон главног вретена у смеру казаљке на сату или у обрнутом смеру). Иако ове одлике називамо основним технолошким одликама алата, њих ипак није неопходно унети у кораку моделирања алата, јер је то могуће урадити и приликом одређивања технолошких одлика самог захвата;
- б) подаци који описују „уградне” технолошке одлике алата као што су позиција у магацину алата, затим ознака записа, тзв. *dataset*-а, која чува податке о жељеној компензацији, односно тзв. *offset* број алата<sup>15</sup>;
- в) подаци који описују „додатне” технолошке одлике алата попут материјала алата, могућности за пласман расхладног средства (што ће помоћи *CAPP/CAM* апликацији да у извршном коду формира наредбу за одговарајући канал пласмана расхладног средства у зону обраде), затим време трајања алата до губитка потребних резних одлика и сл. (Слика 3-50).

---

<sup>14</sup> Може бити посебно важна дозвољена дубина резања, како би се током симулације захвата утврдило да ли се прелази дозвољена дубина резања.

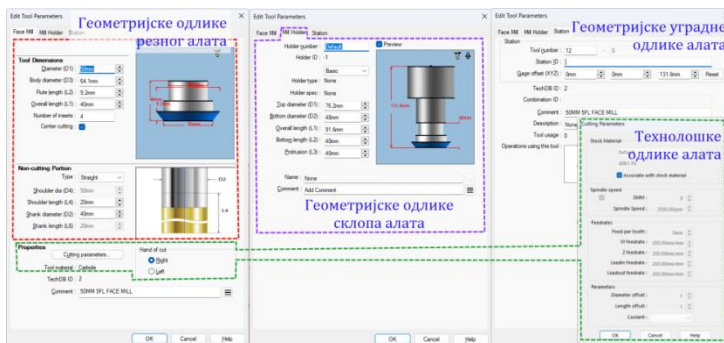
<sup>15</sup> Постоје случајеви да се за један алат има два записа о компензацији облика, попут алата који имају два резна профила.

Геометрија модела алата која се користи у *CAPP/CAM* апликацијама се назива *обрадном геометријом алата* и она је упрошћена у односу на стварну геометрију (стварног) алата. Међутим, она је оптимална за анализу обраде, односно симулацију и анимацију. Обрадна геометрија обртних алата, попут глодала, бургија, проширивача, развртача, урезница и сл., формира се као запремина коју тај алат заокупља приликом свог обртања око осе. Дакле, упрошћени облик ових алата, који се користи у анализи путање и запремине која се уклања њиме у захвату, модел је запремине настале обртањем *граничног профила алата* (Слика 3-48).



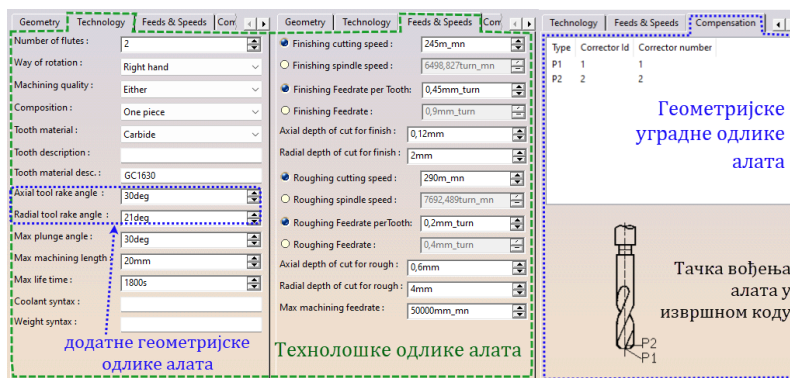
Слика 3-48 Приказ група података којима се подешавају геометријске одлике алата у *CAM* модулу Catia PLM.

Поред облика самог (резног) алата, у *CAPP/CAM* апликацијама је могуће и пожељно приказивање *склопа алата* који се састоји од самог резног алата и држача алата (Слика 3-49).



Слика 3-49 Приказ група података којима се подешавају све одлике алата у *CAM* модулу SolidWorks PLM.

На тај начин, омогућава се анализа задирања свих делова склопа алата у запремине изратка, делова алата за стезање припремка и делова машине. Једино, у случајевима, када се жели веома реалистична симулација (анимација) обраде, на пример, ради промоције могућности софтвера, поједине *CAPP/CAM* апликације имају могућност да приказују облик алата са свим детаљима.



Слика 3-50 Приказ група података којима се подешавају технолошке и геометријске уградне одлике алата у *CAM* модулу *Catia PLM*.

### 3.2.1.3 Одлике релативног кретања алата и обратка у захвату

Свакако, најсложенији корак у моделирању захвата представља моделирање путање алата. Путања алата је „геометријско место тачака“ кроз које пролази *врх алата* (*tool tip*) или нека друга карактеристична тачка геометрије алата (нпр. најистуренија тачка на ободном, граничном профилу алата) док обавља захват. То „геометријско место тачака“ је одређено коначним скупом тзв. *одредишних тачака* кроз које пролази врх алата, а које, уједно представљају крајње тачке низа праволинијских или криволинијских елемената од којих је састављена путања алата (Слика 3-51). Дакле, путања алата је сложени склоп 2D и/или 3D кривих и полилинија. Координате сваке од одредишних тачака су једнозначно одређене у односу на  $W\_CSYS$  а, онда, посредно, преко вектора  $[MW]$  и у односу на координатни почетак координатног система машине  $M\_CSYS$ . Међутим, путања алата је само део укупног модела *релативног кретања алата и обратка у захвату* исказан у односу на  $W\_CSYS$ . Додатно, релативно кретање алата и обратка у захвату одликује и *вектор смера осе алата*. Он мора бити једнозначно одређен за сваку тачку путање (не само за одредишне тачке) тако што се за сваку тачку путање утврђују углови нагиба вектора смера осе алата у односу на сваку осу координатног система  $W\_CSYS$  ( $X^{(w)}$ ,  $Y^{(w)}$ ,  $Z^{(w)}$ ).



**Слика 3-51** Основне одлике путање алата и релативног кретања алата и обратка у захвату. Приказ почетног дела путање за захват 5-осног профилног глодања (CAM модул Catia PLM).

Још један елемент релативног кретања алата и обратка у захвату је и обртање алата око своје осе током кретања. Угаона брзина и смер обртања алата су, такође, одлике модела релативног кретања алата и обратка у захвату. Као што већ треба да буде познато, вредност угаоне брзине (која се може исказати преко броја обртаја главног вретена и алата) у непосредној је зависности од задате брзине резања и пречника обртног алата. Коначно, при моделирању релативног кретања алата и обратка у захвату, потребно је задати интензитет компоненте брзине алата у односу на обрадак у правцу путање за сваку тачку путање алата. Заправо, ради се о *помаку* (кораку или посмаку) алата. При моделирању релативног кретања алата и обратка у захвату може бити потребно да се за различите секције или делове путање алата (2D, 3D криве и полилиније) задају различите вредности помака, па, тако можемо, за оне делове путање када алат „улази у захват”, подесити (задати) да *помак*, као одлика релативног кретања алата и обратка, „узима” вредност *помака приликом уласка у захват (approach feedrate)* који је, на пример, мањи од *помака приликом резања*, односно од помака при тзв. *радном ходу (machining feedrate)*.

Напомена: Треба разумети да су вредности помака и брзине резања технолошке одлике захвата и оне се, обично, у CAPP/CAM апликацијама уносе (задају) приликом подешавања технолошких одлика захвата, али се подешавањем одлике *врсте помака* неком од делова путање посредно додељује вредност помака која је за ту *врсту помака* унета приликом подешавања технолошких одлика захвата.

Имајући у виду различите концепције НУ машина (НУ глодалица), у погледу кретања носача алата (главног вретена) и оријентације радног стола, а са њим и припремка/обратка, веома је битно да се симулација релативног кретања обави са свим потребним детаљима (деловима машине и стезног прибора), како би се недвосмислено утврдило да ли постоји недозвољено задирање алата у запремину машине, изратка и прибора за стезање. У случају 5-осне обраде, веома је ризикантно обављати симулацију захвата без алата за стезање (и појединих истурених елемената машине, нпр. делова радног стола), јер инжењеру може бити тешко да у потпуности визуелизује релативно кретање свих запремина (алата, изратка, прибора за стезање припремка, радног стола и др.).

Релативно кретање алата и обратка у захвату, поред горе поменутих (основних) одлика, одређено је и низом других одлика које се могу назвати *технолошким* с обзиром на то да њиховим подешавањима инжењер непосредно одређује начин или метод којим жели да се захват обраде спроведе, односно каквим ће се релативним кретањем алата и обратка извршити уклањање жељене запремине припремка/обратка. Знања којима се инжењер води приликом одређивања ових одлика превасходно су из области технологије обраде (резања глодањем). Пошто ће у наредном излагању бити речи о тим одликама и њиховим утицајима на изградњу релативног кретања алата и обратка у захвату, пре свега треба скренути пажњу на разлику између тзв. *главног (обрадног) дела и помоћног дела* релативног кретања алата и обратка у захвату. Главним или обрадним делом кретања се назива онај део кретања када алат обавља обраду (уклања материјал, односно постоји контакт између алата и обратка), док се за помоћни део релативног кретања алата и обратка у захвату сматра онај део кретања када алат није у директном контакту са обратком.

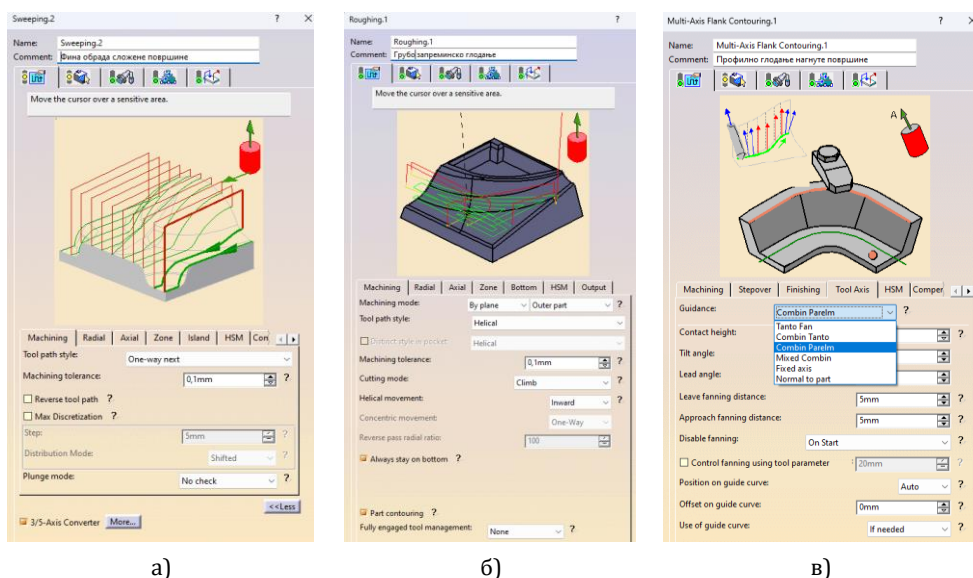
### **3.2.1.3.1 Главно кретање (главни део релативног кретања алата и обратка у захвату)<sup>16</sup>**

Приликом моделирања главног кретања алата и обратка обично је потребно подесити велики (или не мали) број параметара како би се моделирани захват учинио изводљивим за *CAPP/CAM* апликацију, одно-

---

<sup>16</sup> Не треба поистоветити главно кретање у контексту машинске обраде резањем са одредницом „главно релативно кретање алат и обратка у захвату глодања“. *Главно кретање* нам је као одредница позната од раније и она се односи на кретање алата која узрокују резање материјала, а, у случају глодања, то је обртно кретање алата. У том истом контексту помоћно кретање може се тумачити као кретање алата чија брзина се обично исказује као помак, посмак или корак.

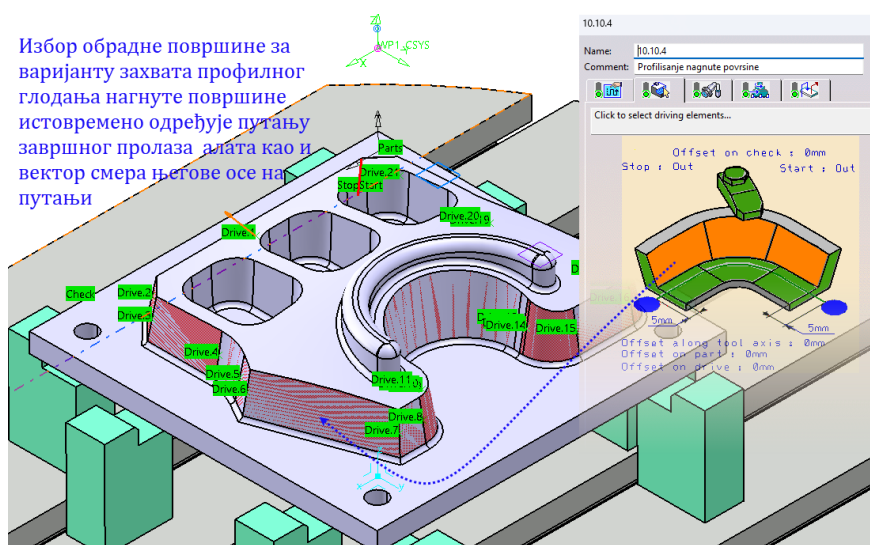
сно, како би било могуће обавити симулацију релативног кретања алата и обратка и анимацију захвата обраде (анимацију уклањања материјала током обављања захвата). Вредности поменутих параметара одређују одлике главног кретања оне варијанте захвата која је изабрана да буде моделирана. Свака варијанта захвата има себи својствени скуп унапред припремљених одлика чијим се подешавањем (преко вредности параметара) одређује главни део релативног кретања алата и обратка (Слика 3-52). Што је захват сложенији, обично је и број одлика, односно број параметара чије вредности треба подесити, већи.



**Слика 3-52** Различите варијанте захвата имају себи својствен скуп одлика којима су одређене. На сликама је приказан део одлика којим се одређује релативно кретање алата и обратка за варијанту захвата а) фине обраде површине „пребрисавањем”, б) грубог запреминског глодања и в) 5-осног глодања бочне нагнуте површине.

Такође, треба имати на уму да на утврђивање одлика главног дела релативног кретања алата и обратка, поред вредности параметара самог главног кретања, могу да утичу и параметри, односно одлике других елемената захвата (обрадна геометрија, алат и технолошке одлике захвата). Слика 3-53.





**Слика 3-53** Приказ утицаја одлика обрадне геометрије на формирање путање и других одлика релативног кретања алата и обратка у захвату.

### Технолошке одлике главног кретања

Технолошке одлике релативног кретања алата и обратка у току обраде могу бити веома разноврсне спрам изабране варијанте захвата. Свака *CAPP/CAM* апликација има свој скуп припремљених варијанти захвата. При томе, називи варијанти захвата, иако у основи исти, могу се разликовати по називу (нпр. за чеоно глодање можемо наћи *Face milling* и *Plane milling*), а могуће је и за исте технолошке одлике главних кретања наћи различите називе (нпр. за супротно-смерно глодање *conventional milling* и *upcut milling*, а за истосмерно *climb milling* и *down milling*). Коначно, у свакој *CAPP/CAM* апликацији груписање технолошких одлика главног кретања у интерфејсу, такође, може бити веома различито. Ипак, и поред све те разноликости, могуће је све *технолошке одлике главног кретања* разврстати на следеће групе и подгрупе:

1. одлике које одређују детаље путање алата
  - а) Стил или општи облик путање алата – нпр. *хеликоидно кретање*, *спирално*, *напред-назад*, *цик-цак*, *у једном правцу*, *кружно*, *трохоидално* и сл.;
  - б) одлике тзв. локалних делова путање, када се очекују велика убрзања алата, што је обично повезано са обрадом коју одликује велика брзина резања, тзв. *high-speed machining*.
  - в) одлике путање релевантне за нумеричку контролу НУ машине – нпр. дискретизација и начин интерполације елемената.

- ната путање алата, 2D и 3D кривих и полилинија, тачка вођења алата;
2. одлике које одређују оријентацију смера осе алата током кретања по путањи,
    - а) начин управљања оријентацијом осе алата,
      - додатне геометријске референце (површи, криве, тачке за контролу оријентације осе);
    - б) параметри оријентације;
  3. одлике које одређују начин обраде, уклањања запремине материјала:
    - а) подела запремине на области (зоне) и редослед обраде по зонама;
    - б) врста обраде (нпр. груба, фина или груба и фина, истосмерно или супротносмерно глодање, да ли је допуштено имати алат у пуном захвату или не и др.)
    - в) начин формирања пролаза обраде (или начин приближавања граничној обрадној површини):
      - Одлике пролаза у правцу осе алата (аксијални пролази);
      - Одлике пролаза у правцу радијуса алата (радијални пролази).

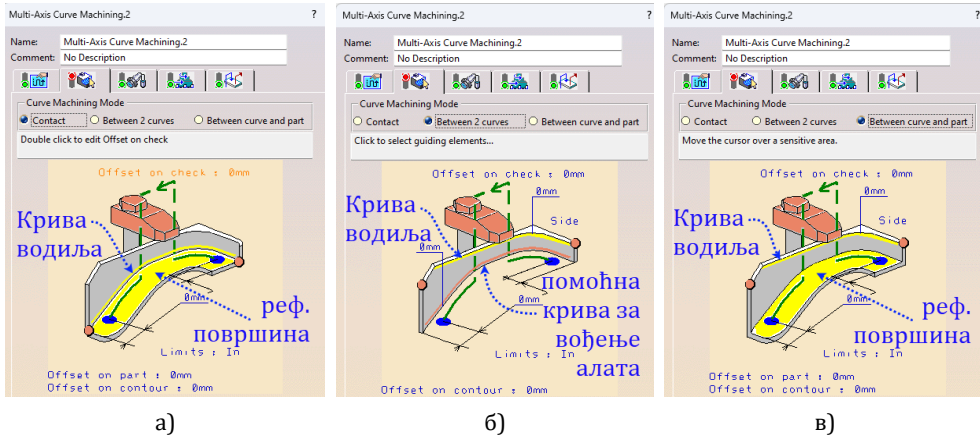
Често, произвођачи *CAPP/CAM* апликација моделирање главног релативног кретања алата и обратка називају одређивањем *стратегије* обраде. Такође, може се наћи да се понуђени стилови путање алата називају *стратегијама* и коначно, можемо наићи на одредницу *стратегија* вођења осе алата током извођења захвата. Иако се не морамо сложити са исправношћу ових одредница, треба имати на уму на шта су дизајнери интерфејса *CAPP/CAM* апликација мислили и, наравно, можемо усвојити овакве одреднице у датом контексту. Када говоримо о моделирању захвата, стратешком одлуком би се пре могао назвати избор варијанте захвата, док се подешавање параметара већ изабране варијанте захвата пре може тумачити као *тактика*.

Имајући у виду да су студенти, након одслушаних предмета ОАС МФН: Програмирање НУМА 1 и Планирање технолошких процеса, већ упознати са многим одредницама које се јављају код моделирања захвата и релативног кретања алата и обратка, у овом делу ће више пажње бити посвећено одликама оријентације смера осе алата током кретања по путањи алата. Управо ове одлике омогућавају најсложенија кретања алата (тзв. 4-осна и 5-осна обрада) и израду веома сложених облика глодањем. Такође, данас је скоро немогуће замислити моделирање захвата

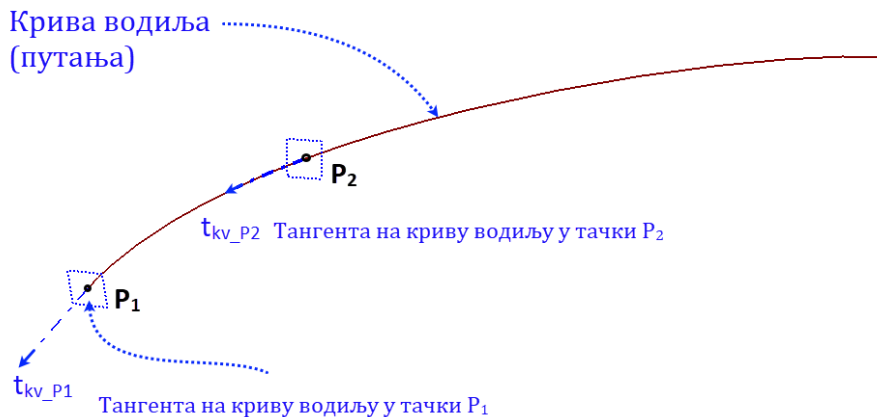


4-осне и 5-осне обраде и добијање одговарајућег (исправног) извршног програма за НУ машине без употребе *CAPP/CAM* апликација. Иако се 3-осном обрадом могу изградити скоро сви облици који се срећу у пракси, и иако 3-осну обраду одликује већа динамичка стабилност у односу на 4-осну и 5-осну обраду (због повољнијег полигона сила резања и сила отпора резању), у специфичним случајевима сложених површина које треба формирати глодањем, неупоредиво је продуктивније применити 4-осну и 5-осну обраду. У таквим случајевима, 4-осна и 5-осна обрада захтева знатно мањи број стезања у односу на 3-осну обраду, а самим тим, смањује се могућност појаве одступања од облика и димензија виших од дозвољених (тачност облика и номиналних мера бива нарушена). Такође, 4-осна и 5-осна обрада допушта да се, чак и кад се обрађују те сложене површине, користе стандардни елементи стезног алата и прибора. На тај начин се, у великој мери, умањују напори и време потребно за израду посебних елемената стезног алата које би 3-осна обрада захтевала. У пракси, 4-осно и 5-осно глодање је углавном намењено обављању тзв. полу-завршне и завршне обраде (фина обрада) где се очекује да се просечна висина неравнина површине након ових обрада креће између  $3,2\text{ }\mu\text{m}$  и  $0,8\text{ }\mu\text{m}$ , односно да се површина изради са квалитетом N8, N7, N6. Истовремено, једно од неписаних правила из реалне праксе је да се процена вредности услуге машинске обраде глодањем (често) обавља на основу времена потребног за обављање fine обраде. С тим у вези, кад год треба искористити продуктивност 4-осне и 5-осне обраде да би се моделирао одговарајући захват (полу-завршне или завршне) обраде који ће резултирати сложеном површином циљане тачности и храпавости, потребно је ваљано осмислити главно релативно кретање алата и обратка у захвату. Када говоримо о подешавању одлика главног кретања алата код 4-осне и 5-осне обраде, незаобилазно је подесити одлике (или контролу) оријентације смера осе алата током кретања по путањи алата. На примеру моделирања захвата *4-осног или 5-осног глодања по 3D кривој водиљи* приказаћемо неке од основних одредница у вези са 4-осним и 5-осним глодањем (Слика 3-54).

Ако замислимо да се алат креће по некој (сложеној) просторној кривој (путањи или водиљи – Слика 3-55), што, заправо, значи да се изабрана карактеристична тачка алата (нпр. врх глодала који се налази на пресеку осе глодала и калоте глодала са лоптастим резним крајем) креће по тој кривој, да би смо могли једнозначно да одредимо оријентацију глодала у свакој тој тачки путање/криве потребно је имати одређен смер оријентације осе глодала (јединични вектор осе алата).

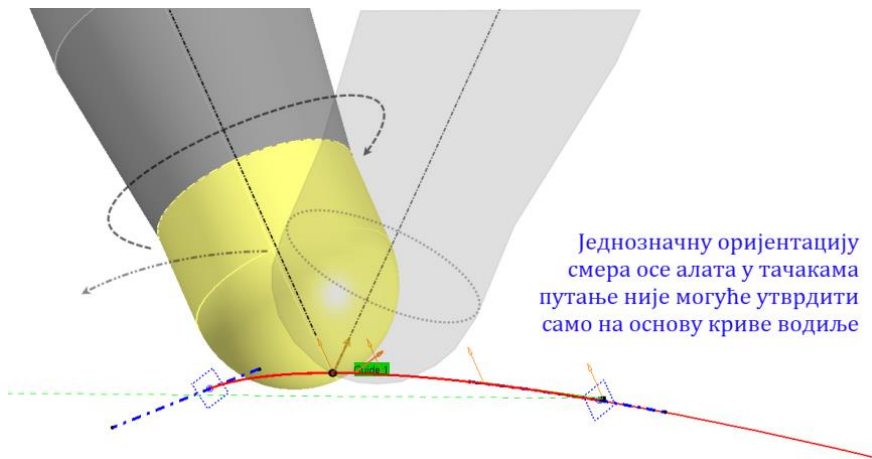


**Слика 3-54** Три понуђена начина одређивања обрадне геометрије захвата 4-осног и 5-осног глодања по просторној кривој.



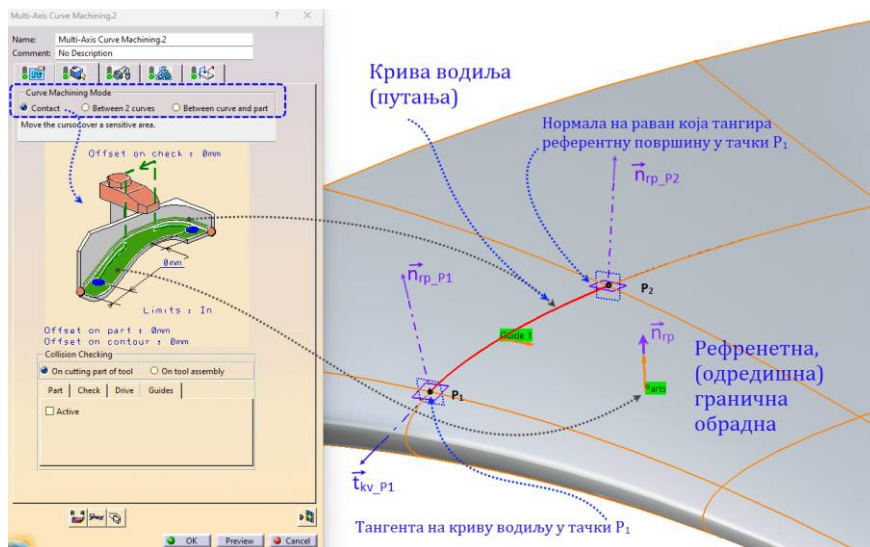
**Слика 3-55** Сложена просторна крива која се може искористити као водиља за алат

Тек када имамо познате све тачке те криве и одговарајуће оријентације смера осе глодала дуж тих тачака, могуће је извршити анализу запремине коју би тај алат својим резним профилем могао да уклони водећи се при кретању том кривом на тај начин. Крива водиља није довољна за једнозначно одређивање смера осе алата, већ је потребно увести још једну геометријску референцу (Слика 3-56).



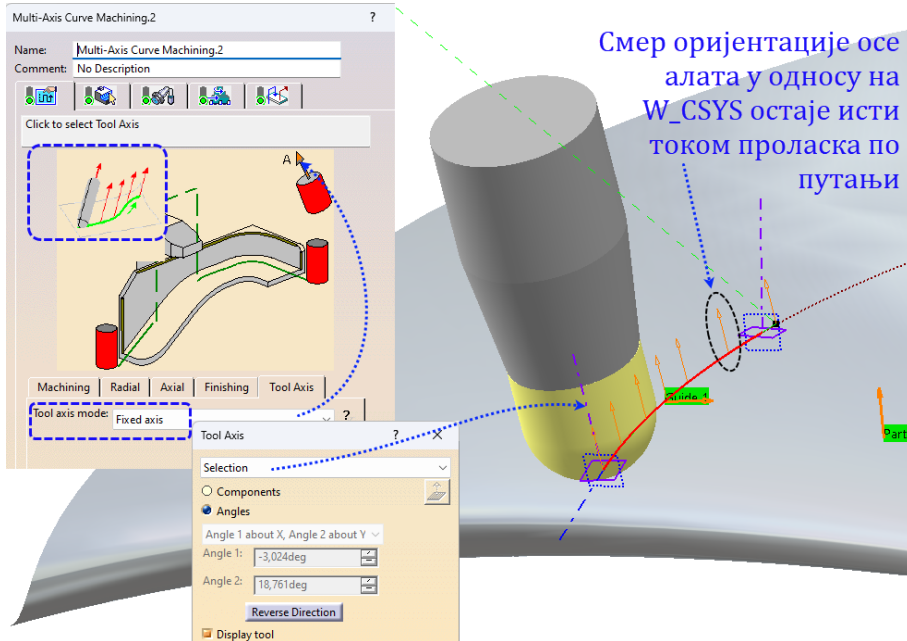
**Слика 3-56** Крива водиља и две од безброј могућих оријентација смера осе алата.

Из тог разлога, приликом моделирања захвата, потребно је изабрати још један, додатни референтни геометријски ентитет. У овом случају CAPP/CAM апликације обично нуде да се референцира извесна површина или тзв. *помоћна крива водиља*. Када се за додатну геометријску референцу бира површина, онда се, обично (мада не и обавезно), бира обрадна, одредишна (гранична) површина (Слика 3-57).



**Слика 3-57** Приказ одређивање обрадне геометрије за захват захвата 4-осног и 5-осног глодања по просторној кривој за варијанту када крива водиља „лежи“ на, тј. припада граничној површини.

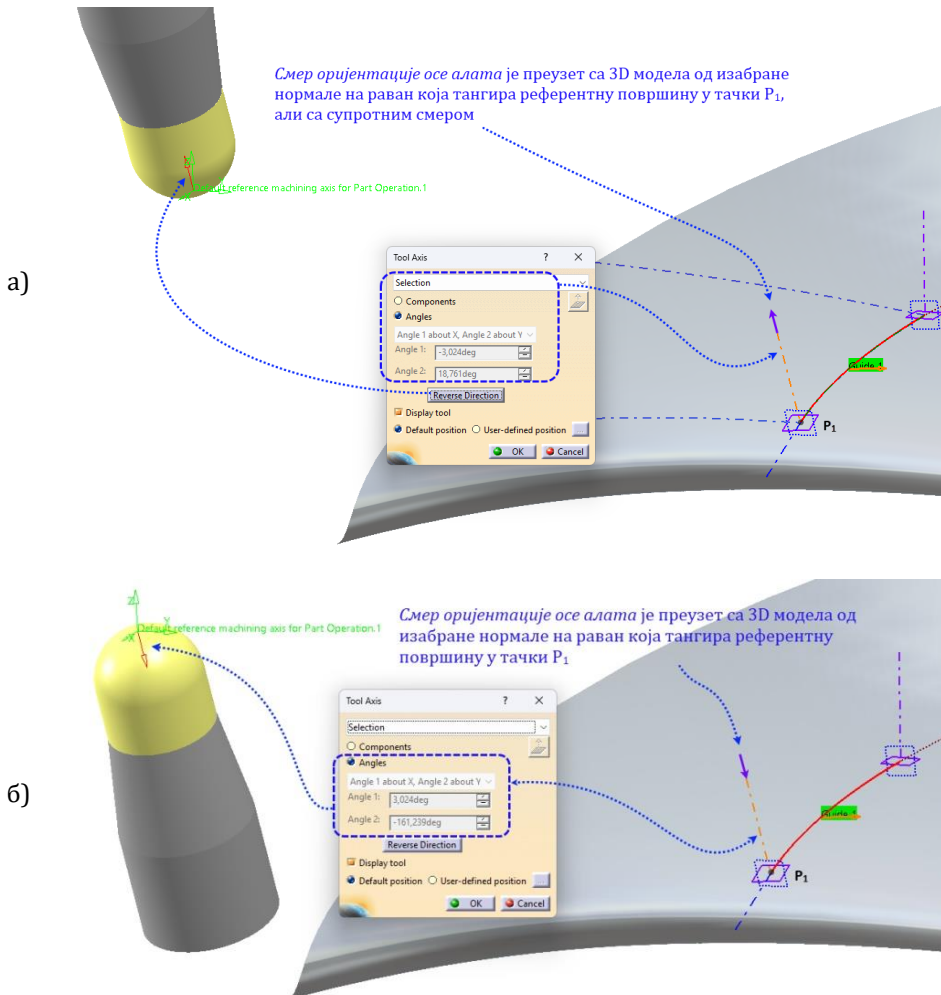
Приликом подешавања смера оријентације осе алата могуће је изабрати неку од више припремљених опција за контролу осе дуж тачака криве водиље (Слика 3-58). Иницијална изабрана опција је најчешће тзв. непроменљиви смер (*fixed axis*).



**Слика 3-58** Избор опције контроле смера осе алата дуж тачака криве водиље.

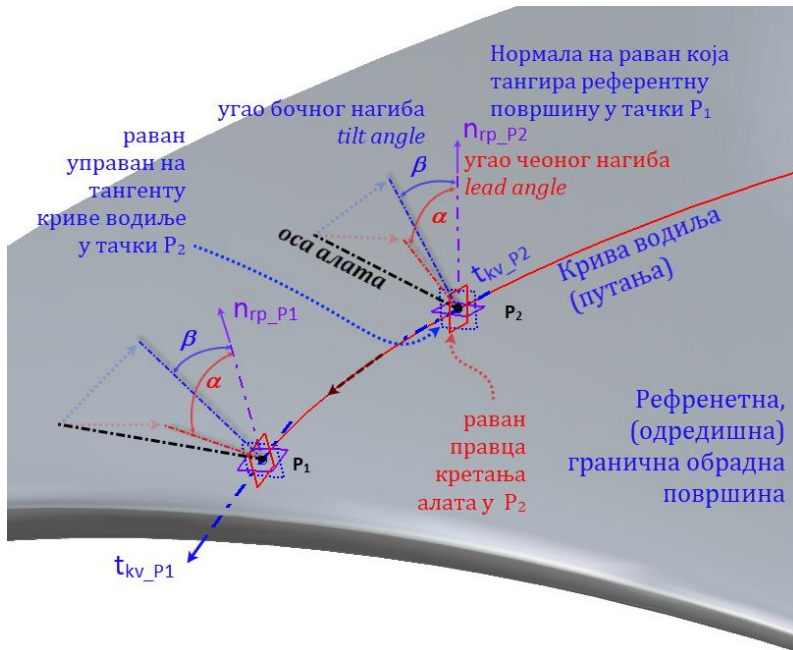
Смер осе алата се мора експлицитно изабрати јер од њега зависи с које стране референтне граничне површине ће се вршити обрада. На слици (Слика 3-59) виде се две супротне оријентације смера осе глодала над истим правима које су генерисане у тачкама криве водиље као нормале на равни које тангирају референтну граничну површину у тим тачкама<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Ради једноставности, у даљем тексту ћемо користити само редуковану одредницу - „нормале” за нормале на равни које тангирају референтну граничну површину у тачкама криве водиље.

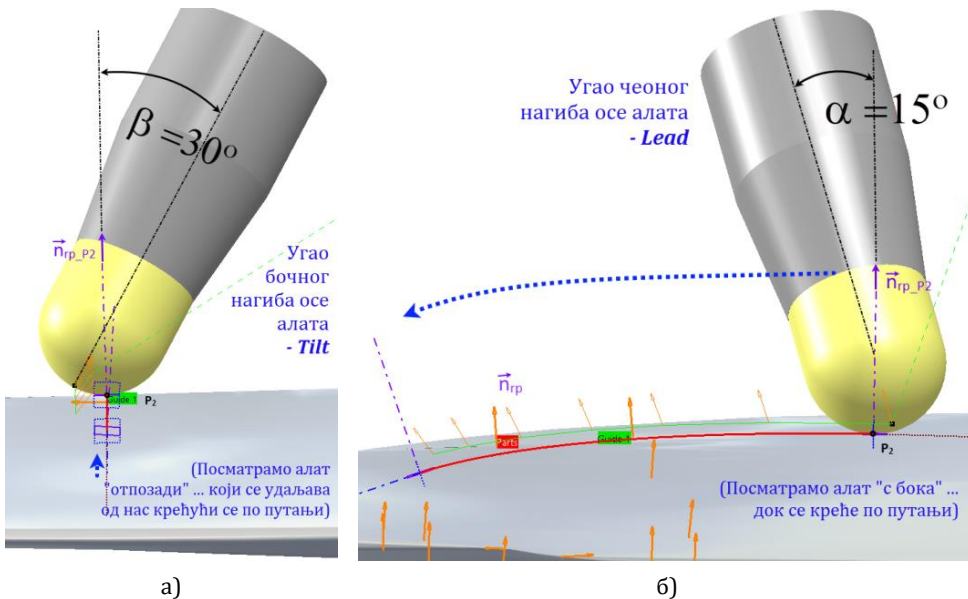


Слика 3-59 Избор смера алата одређује страну са које ће се вршити обрада.

Поред тога што може да се поклапа са нормалама, оса алата може бити и нагнута у односу на те нормале. Сложени нагиб се може разложити на две компоненте – *чеони нагиб* (*lead*) и *бочни нагиб* (*tilt*). Угао *чеоног нагиба* или *lead angle* је угао који се мери између пројекције осе алата у равни правца кретања алата и нормале. Раван правца кретања алата се гради између тангенте криве водиље и нормале на референтну граничну површину у посматраној тачки криве водиље. Угао *бочног нагиба* или *tilt angle* је угао који се мери у равни управној на тангенту криве водиље у посматраној тачки криве водиље (Слика 3-60 и Слика 3-61).



Слика 3-60 Конструкције углова чеоног и бочног нагиба над тачкама криве водиље.

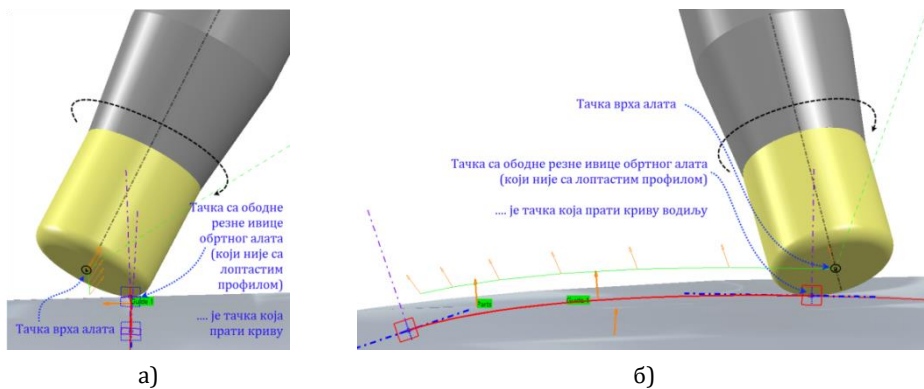


Слика 3-61 Углови бочног (а) и чеоног (б) нагиба у одговарајућим пројекцијама.

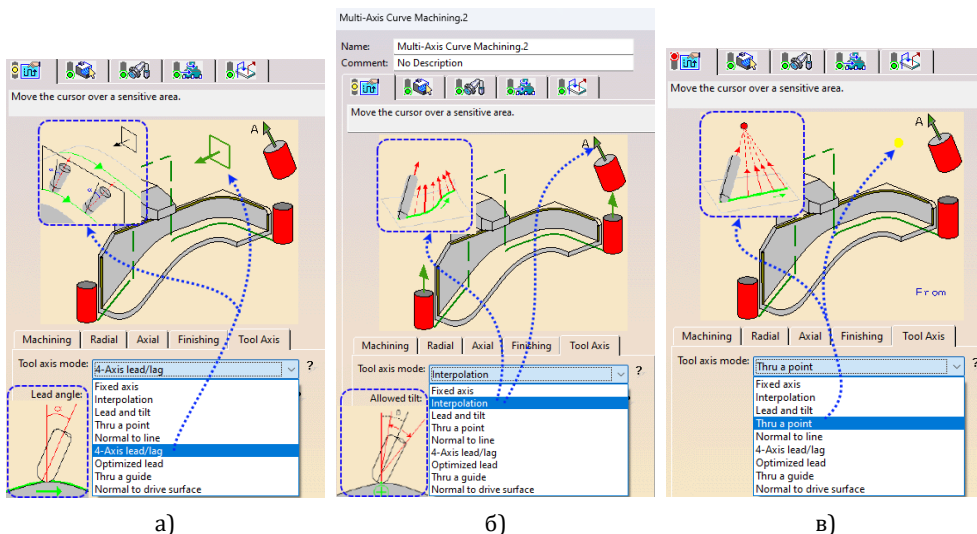
Приликом вођења алата по кривој водиљи, уколико постоји бочни или чеони нагиб алата или оба, тачка која ће додиривати криву водиљу



неће бити врх алата, већ одговарајућа тачка са ободне резне ивице профила алата која, због одговарајућих нагиба, тангира граничну референтну површину. На слици (Слика 3-62) приказан је алат који нема лоптасти резни профил, већ профил вретенастог глодача са заобљеном ободном ивицом профила. Нагиби су исти као на слици (Слика 3-61). Слика јасно показује која тачка алата прати криву водиљу и, истовремено, тангира граничну референтну површину.

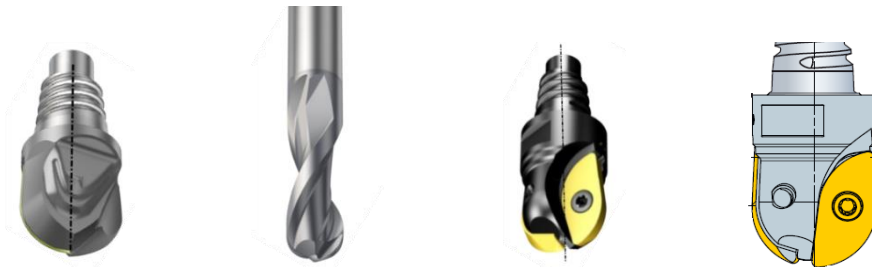


**Слика 3-62** Приказ тачке са обода резног профила алата која се „води“ по кривој водиљи.



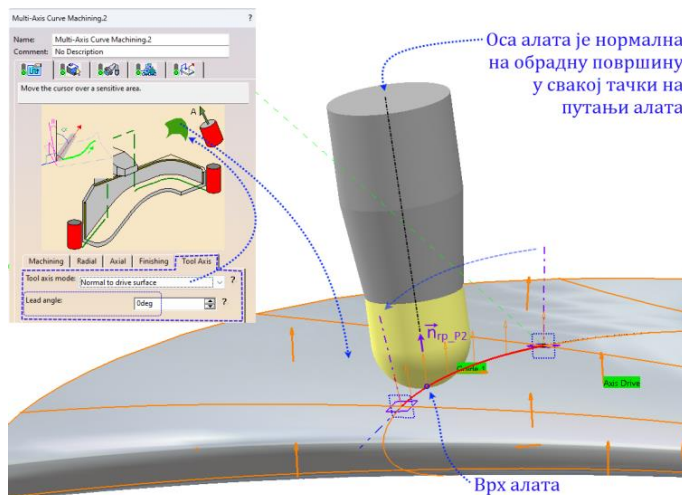
**Слика 3-63** Неке од могућих опција за подешавање одлика контроле оријентације смера осе алата током кретања по кривој водиљи: (а) форсирана 4-осна обрада са могућношћу подешавања чеоног угла нагиба (б) интерполација по кривој водиљи са опсегом дозвољених вредности за угао бочног нагиба и (в) форсирање проласка осе алата кроз изабрану контролну тачку у простору.

Код 4-осне и 5-осне завршне (фине) обраде, веома често се користе глодала са лоптастим резним врхом, односно полукружним профилом (Слика 3-64).



**Слика 3-64** Глодала са лоптастим врхом (полу-кружним) профилом.

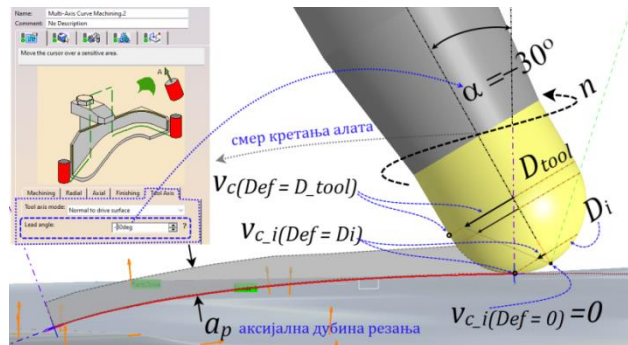
Када се користе глодала са лоптастим резним врхом, није пожељно да оријентација осе алата буде нормална на површину (Слика 3-65). Постоје два разлога због којих треба избегавати такво вођење алата. Пре свега, на самом врху алата, грудна страна алата, ако је уопште има, веома је плитка. Други разлог је тај што је обимна компонента релативне брзине резне ивице у односу на обрадак на врху глодала, на оси, једнака нули, тако да је једина преостала компонента брзине релативног кретања алата и обратка у тој тачки, компонента брзина кретања алата по кривој водиљи (путањи). Према томе, преостала компонента релативне брзине резне ивице у односу на обрадак у центру глодала је једнака *помаку* глодала.



**Слика 3-65** Глодало с лоптастим резним врхом у захвату у коме је подешено да током вођења алата по кривој водиљи, оса алата буде нормална на одредишну, граничну, обрадну површину.

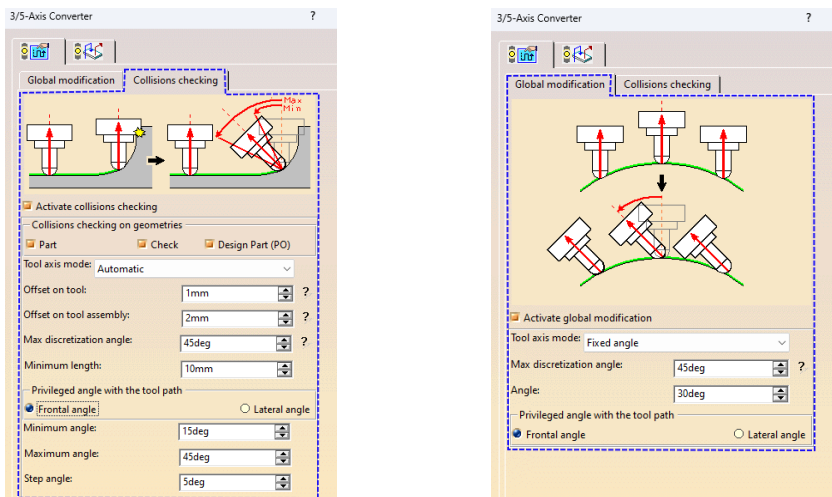


У таквим околностима, врх алата се „вуче“ по обрадној површини, што је веома непожељно. Из тог разлога, обично се предлаже да се угао чеоног нагиба осе глодала подеси тако да тачка са обода резног профила алата, која се води по кривој водилји, буде на одговарајућем одстојању од осе глодала ( $D_i$  на слици - Слика 3-66) како би њена обимна брзина била већа од нуле и тиме се спречило „вучење“ било које тачке алата која има контакт са материјалом обратка током обраде.



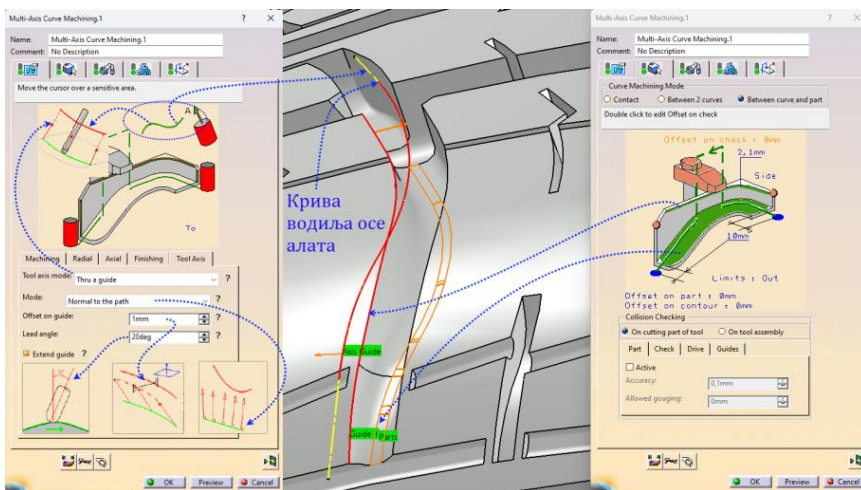
**Слика 3-66** Обимне брзине на ободној резној ивици профила глодала са лоптастим врхом чији је чеони нагиб подешен на  $-30^\circ$ .

Приликом подешавања чеоног и бочног угла нагиба осе потребно је посебно обратити пажњу на могуће колизије запремине алата (укључујући држач) са запреминама припремка, изратка, стезним алатом и прибором. Из тог разлога потребно је подесити одлике провере колизија (Слика 3-67).



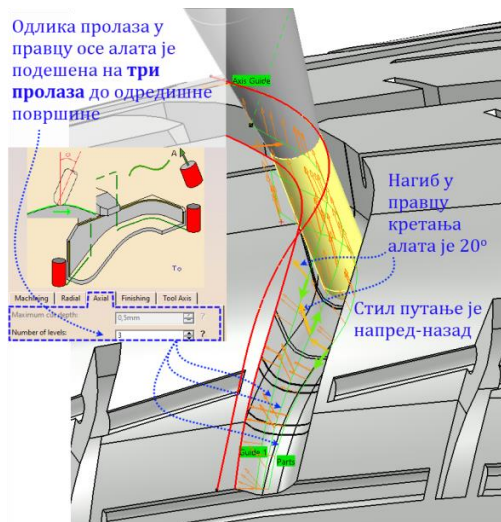
**Слика 3-67** Подешавање одлика провере недозвољеног задирања запремине алата у запремине изратка, стезног алата и додатног прибора за услове 5-осне обраде.

CAPP/CAM апликације пружају већи број опција контроле осе глодала варијанте захвата, које зависе од изабране варијанте захвата. У различитим CAPP/CAM апликацијама понуђене су различите опције и, што је број опција већи, то је инжењеру једноставније да изабере ону која највише одговара условима обраде (која је најпродуктивнија). На слици (Слика 3-68) приказана је секвенца у моделирању 5-осне израде латералног канала, тзв. мастер модела алата за вулканизацију аутомобилског пнеуматика. Облик тог канала је веома сложен јер је одредишна обрадна површина тороидална, крива водиља је 3D крива која се простире по спољашњој, такође тороидалној површини (али не одредишној површини), а попречни профили канала, исцртани на равнима које су нормалне на криву водиљу у крајњим тачкама криволинијских и праволинијских ентитета криве водиље, променљивих су облика. Моделирање релативног кретања алата и обратка захтева посебну пажњу, с обзиром на променљиве нагибе страна канала. Уз то, треба осигурати да се врх глодала не „вуче“ по одредишној обрадној површини, односно да подесимо угао чеоног нагиба на  $20^\circ$ , а да ипак не дође до међусобног задирања запремина алата и издатка. Из тог разлога, једна од могућности је да се контрола осе алата подеси преко тзв. *криве водиље осе алата*. Поред криве водиље одговарајуће тачке ободног профила алата, крива водиља осе алата ће „држати“ осу алата (у складу са вредностима параметара „држања“, као што су, на пример, управно одстојање осе алата од криве водиље осе алата и изабрани начин вођења осе – управно на криву водиљу).

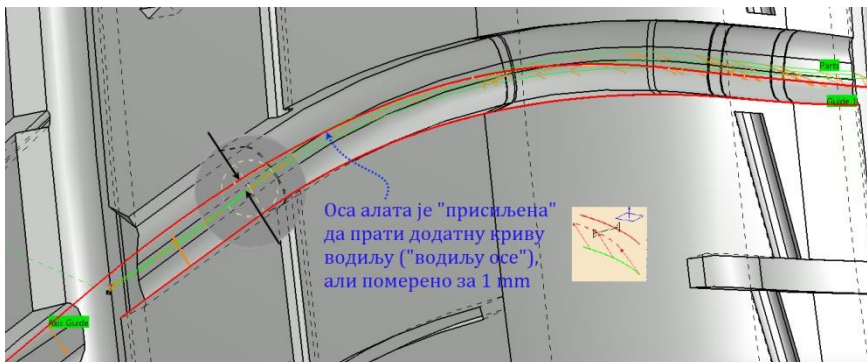


**Слика 3-68** Подешавање вођења осе алата преко додатне криве водиље (криве водиље осе алата) као опције за случај израде латералног канала мастер модела калупа за вулканизацију аутомобилског пнеуматика.

У овом случају ради се о обради канала која није само завршна (фина), већ се материјал запремине читавог канала треба уклонити. То захтева додатно подешавање одлика тако што се уноси вредност броја пролаза у правцу осе (предвиђено је да буде три пролаза до дна канала). То подразумева да је тачка ободног резног профила алата, која се користи за вођење алата по кривој водиљи, у сваком пролазу, на другом месту, чиме се додатно усложњава контрола нагиба алата (Слика 3-69). Из тог разлога додатна контрола осе алата, која је у овом случају подешена избором опције криве водиље осе алата, је потребна да алат, у току захвата уклањања главног дела запремине канала (без завршног пролаза), не продре у запремину изратка (Слика 3-70).

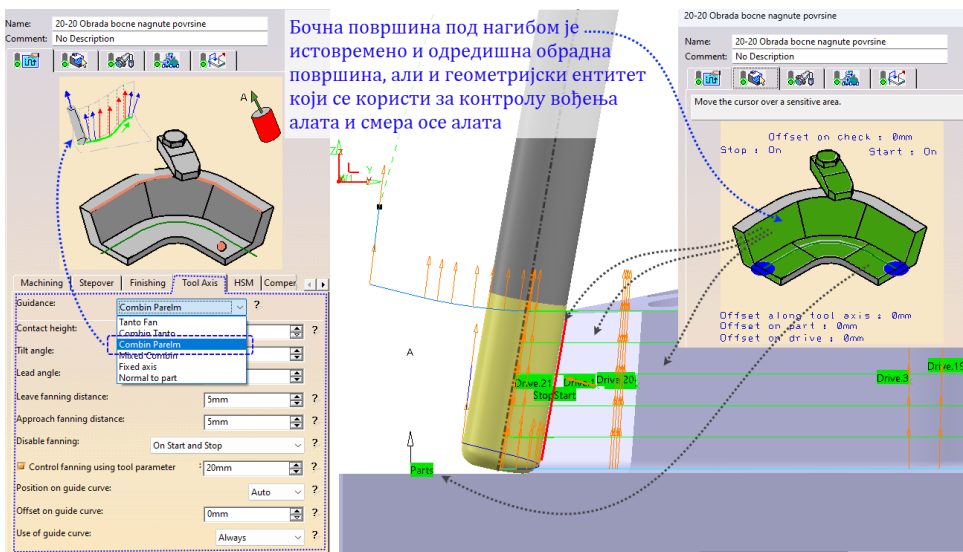


**Слика 3-69** Приказ три пролаза (у правцу осе) алата.



**Слика 3-70** Оса алата у току захвата је „измештена“ за 1 mm у односу на конструисану и изабрану криву водиљу осе алата. CAPP/CAM апликација самостално одређује страну измештања алата дуж криве водиље алата у зависности од референтне обрадне површине.

Поред варијанти захвата 4-осне и 5-осне обраде глодањем у којима се алат води кривом водиљом, постоје и друге варијанте захвата ове класе код којих се контрола релативног кретања алата и обратка контролише на другачије начине. При томе, као и у свим другим случајевима, свака *CAPP/CAM* апликација нуди своје посебности у погледу моделирања захвата. У наставку ће бити показана још два примера, односно две варијанте захвата које се нуде у *CAM* модулу *Catia PLM* софтвера. Први пример се односи на варијанту захвата 4-осног, односно 5-осног профилног глодања или захват глодања нагнуте бочне површине. У овом случају, као референтни геометријски ентитет, који служи за контролу осе алата, користи се управо циљана (одредишна) обрадна геометрија, тј. бочна површина до које алат треба стићи у завршном пролазу<sup>18</sup>. У овом захвату референтна бочна површина служи како за вођење алата тако и за контролу осе алата (Слика 3-71). Постоји неколико опција за начин коришћења референтне бочне површине за вођење.



**Слика 3-71** Приказ секвенци подешавања одлика обрадне геометрије и одлика контроле смера осе алата у варијанти захвата глодања бочне нагнуте површине.

Варијанта захвата, иако се ради о 5-осној обради, дозвољава подешавање начина формирања пролаза алата до одредишне обрадне површине и одлике фине обраде (Слика 3-72).

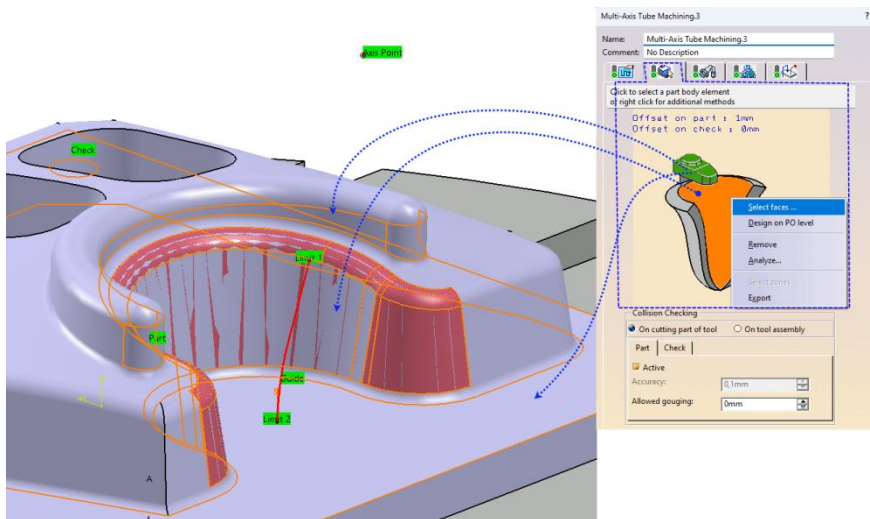
<sup>18</sup> У *CAM* модулу *Catia PLM* софтвера, ова варијанта захвата је означена као *Multi-Axis Flank Contouring*.





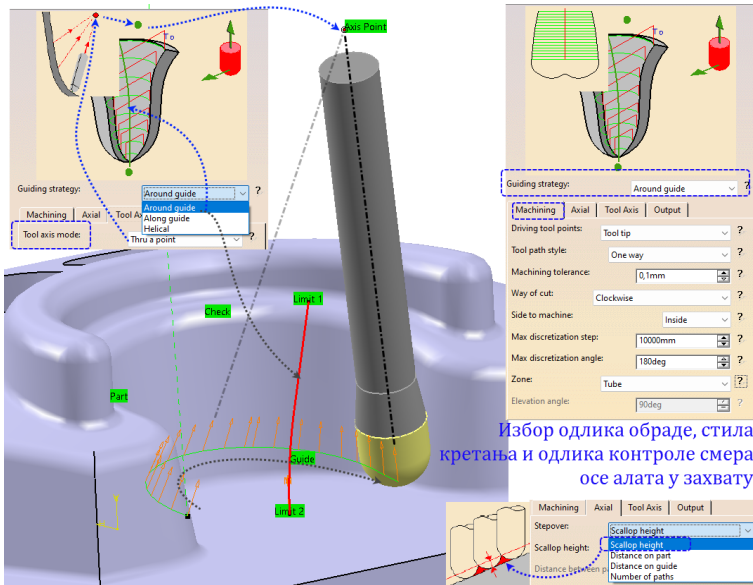
Слика 3-72 Приказ формирања пролаза обраде у више пролаза у радијалном и аксијалном правцу.

Још једна, веома специфична варијанта захвата која се може наћи у збирци понуђених у *CAM* модулу *Catia PLM* софтвера је и 5-осно глодање дубоких удубљења или цевастих облика (Слика 3-73). Код ове варијанте захвата најпре треба изабрати одредишну површину, а потом и одлике контроле осе алата.



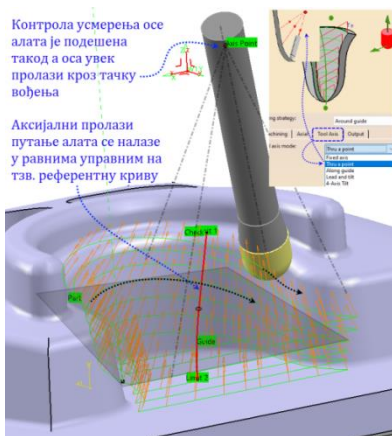
Слика 3-73 Избор одредишне површине према којој ће се формирати релативног кретање алата и обратка.

Подешавање релативног кретања алата и обратка у овом захвату обухвата избор стила кретања током уклањања запремине обратка, затим избор тзв. *стратегије вођења алата* (*Guiding Strategy*) и још пар других параметара као што су смер обилажења одредишне површине и област обраде. Такође, треба подесити параметре формирања пролаза у правцу осе и, коначно, начин контроле осе алата.

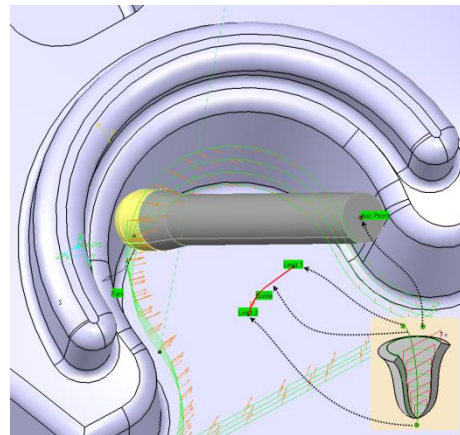


Избор облика обраде, стила кретања и облика контроле смера осе алата у захвату

Слика 3-74 Приказ корака у подешавању параметара 5-осног захвата глодања намењеног дубоким и стрмим сложеним површинама и цевима.



а)



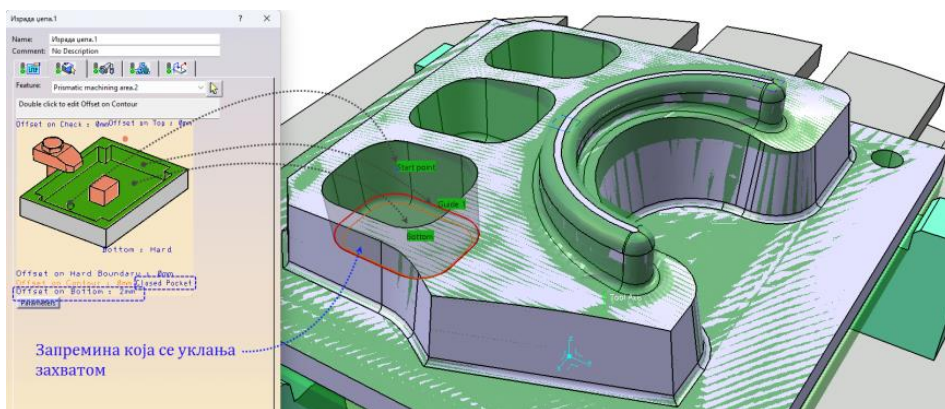
б)

Слика 3-75 Приказ формирање путање алата за варијанту захвата: *Multi-Axis Tube Machining*. (а) избор опције вођења осе алата провлачењем осе кроз тачку, (б) избор просторне криве према којој ће се формирати равни за пролазе.

### 3.2.1.3.2 Помоћна, улазно-излазна кретања алата/обратка

Приликом уласка алата у захват, тј. започињања задирања глодала у материјал припремка/обратка треба тежити формирању геометрије путање алата која ствара минимално ударно оптерећење. Такође, прили-

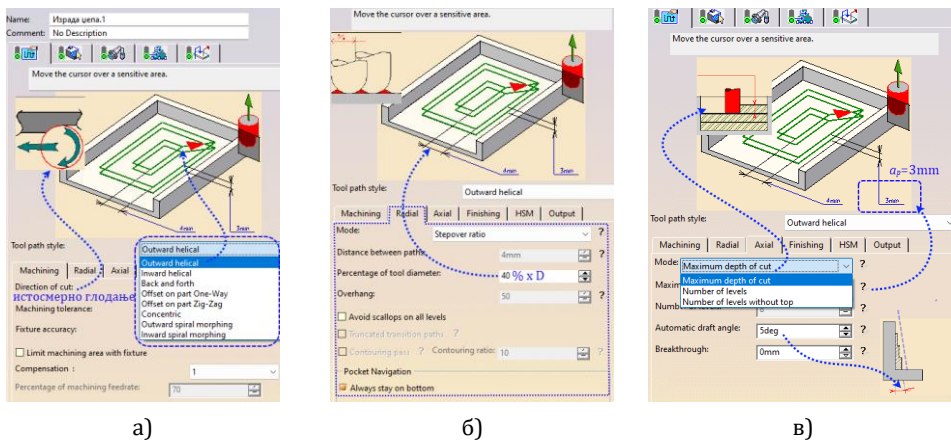
ком изласка алата из материјала обратка, треба тежити да ефекат „избацивања” алата, односно наглог убрзања алата, услед наглог пада сила отпора резању, буде што блаже. Исте појаве наглог позитивног и негативног прираштаја сила отпора резању су присутне у оним сегментима путање алата, када се „повезују” пролази алата (било у радијалном правцу или у правцу осе), док се уклања материјал. И у тим сегментима путање треба тежити умањењу наглих и великих прираштаја сила отпора резања. Ове одлике су посебно важне код тзв. обраде које се одликују великим брзинама резања (*high speed machining*). Да би се то постигло, потребно је водити рачуна о тзв. *помоћним*, или *улазно-излазним елементима* релативног кретања алата и обратка. У основи, прираштај сила отпора резању је у непосредној вези са брзином задирања запремине алата у запремину материјала, тј. са *брзином прираштаја запремине пресека* запремина алата и обратка. Циљана брзина резања и помак су утврђени препорукама о режимима резања за одговарајући захват глодања и то су, свакако, вредности које треба постићи док се врши резање материјала. Ипак, у краткотрајним периодима, када алат улази у материјал и излази из њега, има довољно времена да се управља вредношћу помака. Такође, могуће је „омекшати” улаз у материјал и излаз из њега у тим тренуцима прилагођавањем геометрије *улазних* и *излазних* сегмената путање алата. На слици (Слика 3-76) приказана је путања алата која је добијена моделирањем захвата израде удубљења (цепа) грубим глодањем.



Слика 3-76 Подешавање одлика обрадне геометрије за захват грубог глодања *цепа*.

Након што је извршено подешавање обрадне геометрије, приступа се подешавању одлика релативног кретања алата и обратка. С обзиром да глодало треба да се „укопа” у материјал обратка, постоји потреба за добро испланираним улазом у материјал као и начином „освајања”, од-

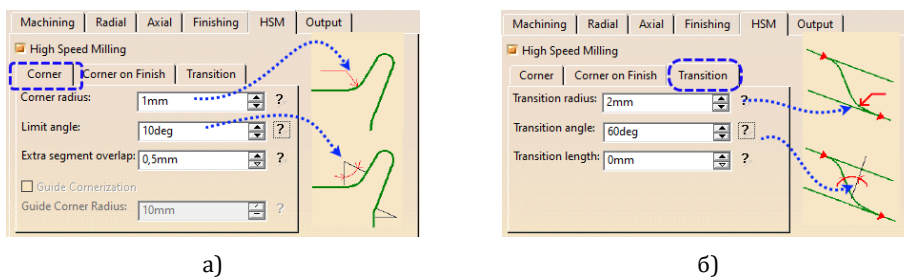
носно уклањања материјала удубљења. Избор општег облика путање треба да обезбеди што блаже прираштаје сила отпора резању приликом преласка једног у други радијални пролаз. Из тог разлога, изабрано је да се алат „укопава“ у материјал обратка на ниво аксијалне дубине резања у средини удубљења, а затим следи тзв. *Outward helical* облик путање који омогућава да се алат не извлачи из захвата са материјалом док уклања први слој материјала. При томе, изабрана путања обезбеђује истоветну ширину захвата (радијалну дубину резања), док се алат креће ка спољним границама удубљења.



Слика 3-77 Подешавање одлика релативног кретања алата и обратка:

- а) подешавање општег облика (стила) путање и врсте глодања,  
б) подешавање одлика радијалних пролаза и в) аксијалних пролаза.

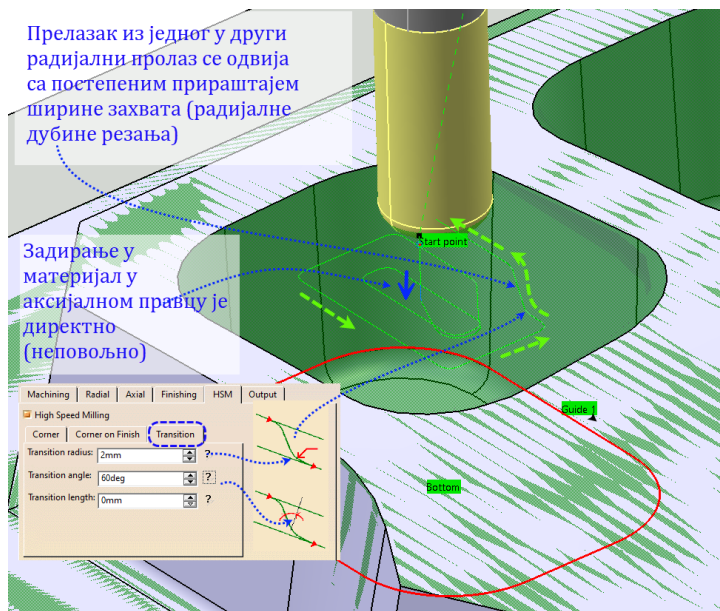
Приликом преласка из једног у други радијални пролаз, као и при обиласку углова, пожељно је подесити одлике локалних делова путања како би се остварили блажи прираштаји сила отпора резању (Слика 3-78).



Слика 3-78 Подешавање одлика локалних делова путање док је алат у захвату, намењено обради коју одликује велика брзина резања, тзв. *high-speed machining*: (а) подешавање одлика локалних делова путање у угловима, (б) подешавање одлика локалних делова путање при прелазу из једног у други радијални пролаз.



На основу подешених одлика за локалне делове путање, прелази алата из једног у други радијални пролаз одвијају се са постепеним прираштајем ширине захвата, што ствара блаже прираштаје сила отпора резању (Слика 3-79).



**Слика 3-79** Приказ путање алата у првом аксијалном пролазу (уклањање првог слоја материјала).

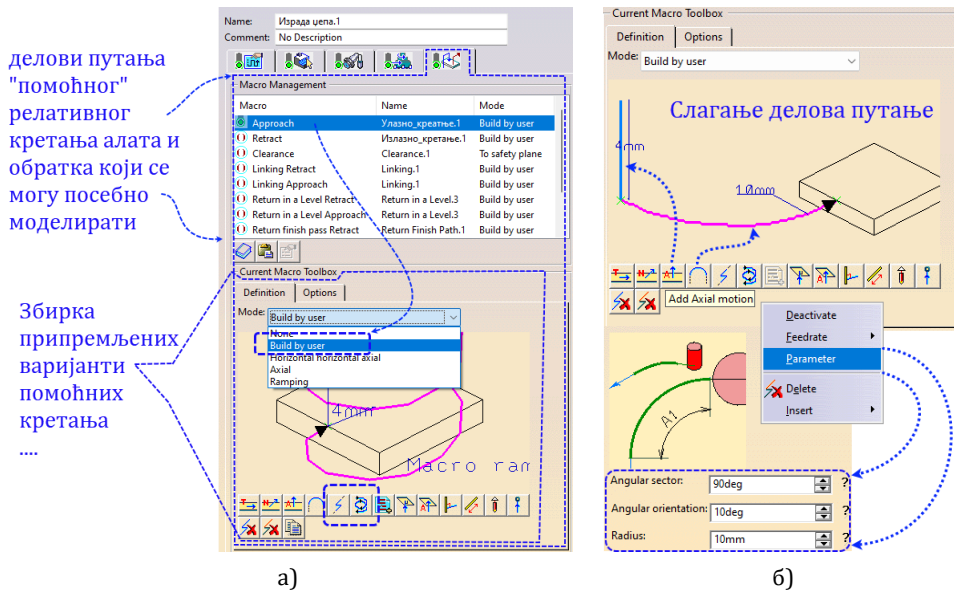
Међутим, улазак у материјал у правцу осе алата, одвија се непосредно, по праволинијском елементу путање (попут бургије), што је неповољно, без обзира на подешену малу дубину резања у аксијалном правцу. Да би се и овај део путање уласка алата у нови слој материјала учинио са постепеним прираштајем дубине резања и, последично, са постепеним прираштајем сила отпора резању, потребно је подесити одлике улазно-излазних кретања алата. Када се говори о „укопавању” глодала у материјал с циљем израде удубљења (цџа), најчешћа препорука је да се користе два начина уласка алата у материјал. Један је тзв. *коси праволинијски улаз (ramping)*, а други је тзв. *улаз у виду завојнице (helix)*. Коси праволинијски улаз се, по правилу, користи као први избор за укопавање у уска удубљења попут жљебова на вратилу, док је улаз у виду завојнице превасходно намењен за укопавање у шира удубљења. Оптимални угао косине дела путање (*угао косог улаза*) за оба приступа укопавања зависи од геометријских детаља резних ивица глодала, односно вредности радијалног и аксијалног грудног угла као и од дужина

резне ивице у подножју глодала. Ипак, у реалној пракси, постоји начелна препорука да угао косине не треба да прелази више од  $15^\circ$ .

Помоћно релативно кретање алата и обратка се може разврстати спрам примене или сврхе на три врсте:

1. прилазно кретање (улазак у захват);
2. излазно кретање (повлачење из захвата) и
3. везно кретање (повезивање између два пролаза главног кретања).

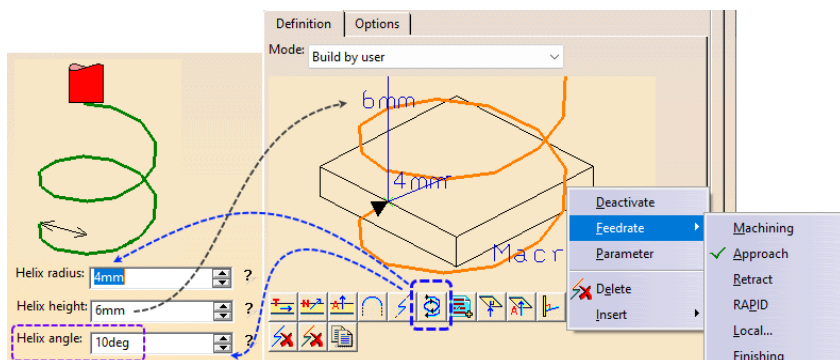
Свака врста помоћног кретања се одликује одговарајућом геометријом, односно путањом и брзином релативног кретања алата и обратка на правцу путање, тј. *помаком*. Моделирање (геометрије) путања помоћног релативног кретања алата и обратка се обично обавља избором припремљених праволинијских или криволинијских елементарних сегмената и њиховим слагањем у сложену криву водиљу – улазну (излазну или везну) путању алата (Слика 3-80). *CAPP/CAM* апликације обично нуде већ припремљене варијанте улазних, везних и излазних путања, с тим да допуштају корисницима да формирају збирке „својих“ специфичних помоћних путања.



**Слика 3-80** Приказ додавања готових делова путање помоћног кретања: (а) Избор врсте помоћног кретања, (б) Слагање сложених путања из више елементарних геометријских ентитета и подешавање одлика геометрије тих делова путање.

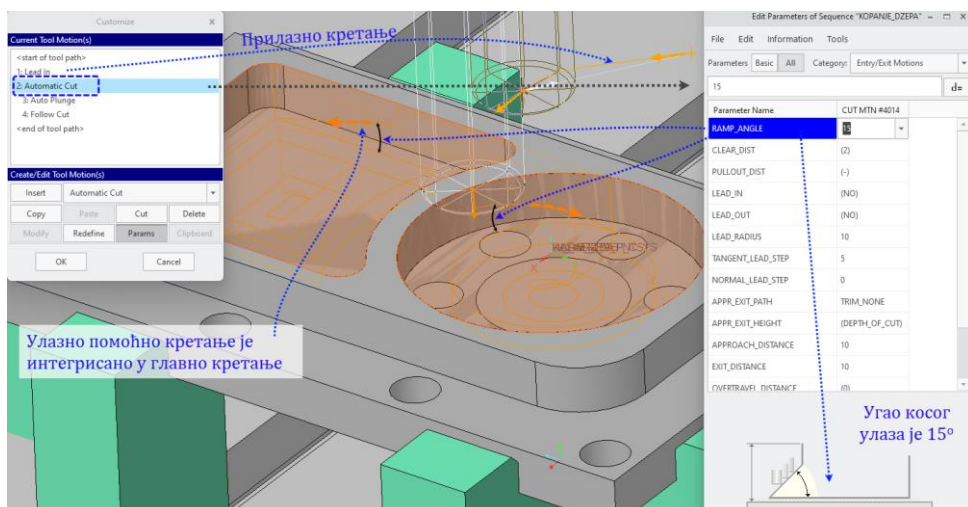
Након што се формира путања помоћног кретања, могуће је задати посебне вредности за помак на сваком сегменту путање. Вредност пома-

ка се обично може већ изабрати из листе понуђених вредности (који су дефинисани технолошким одликама захвата, нпр. вредност помака брзог хода или помака прилазног кретања) или је могуће задати вредност непосредно (Слика 3-81).

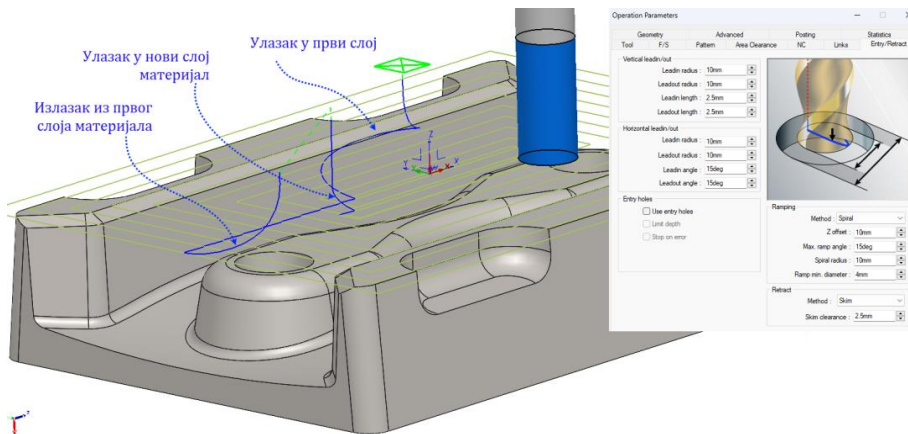


**Слика 3-81** Подешавање вредности параметара геометрије путање и помака на сегментима путање помоћног кретања.

У зависности од *CAPP/CAM* апликације, начин одређивања одлика ових кретања се обавља различито. Тако на пример, у *CAM* модулу *Creo PLM*, можемо видети да се тзв. прилазно кретање раздваја у помоћно кретање алата за улазак у зону обраде и помоћно кретање алата у зони обраде за улазак у захват, тј. у материјал обратка. Моделирање помоћног кретања алата у зони обраде (улазак у материјал, везна кретања између пролаза и излазак из материјала) интегрисано је са поступком моделирања главног кретања (Слика 3-82).

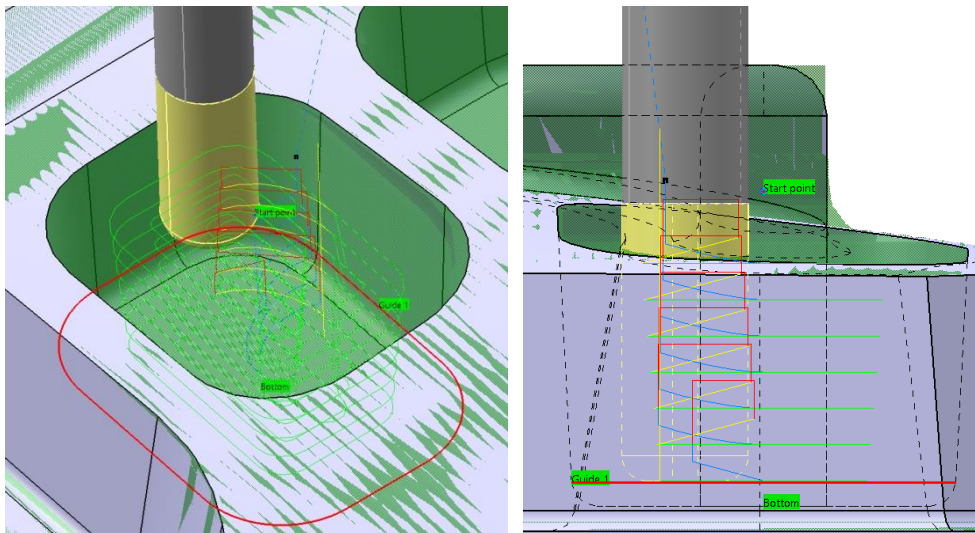


**Слика 3-82** Приказ корака у моделирању путање помоћног кретања у *CAM* модулу *Creo PLM*.



**Слика 3-83** Приказ подешавања одлика улазно и излазних путања у CAM модулу SolidWorks PLM.

На примеру који је приказан на сликама (Слика 3-84 и Слика 3-85) види се цела путања која обухвата улазне путање у први слој материјала и касније у сваки следећи, затим, излазак из сваког слоја материјала и путање повезивања између радијалних и аксијалних пролаза.

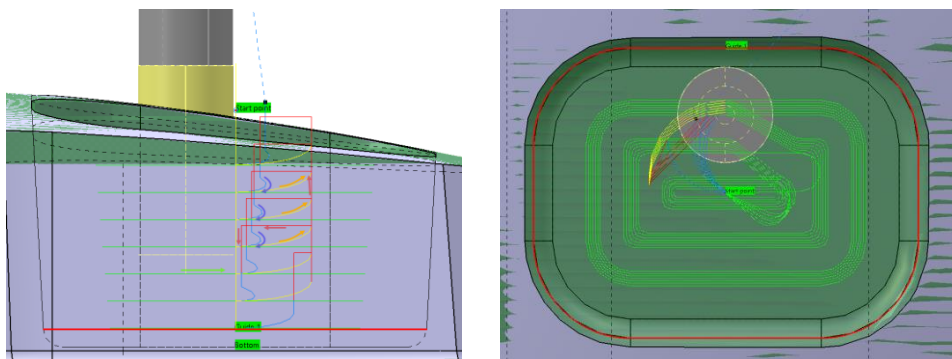


**Слика 3-84** Приказ путање алата у главном и помоћном кретању приликом анимације захвата „копања цепа”.

Путање помоћног релативног кретања алата и обратка су моделиране посебно за улаз у први слој материјала и посебно за излаз из материјала, док је путања за повлачење из зоне обраде (након последњег аксијалног пролаза) моделирана на основу припремљеног сегмента путање (аксијално повлачење). Путање, које су посебно моделиране за у-

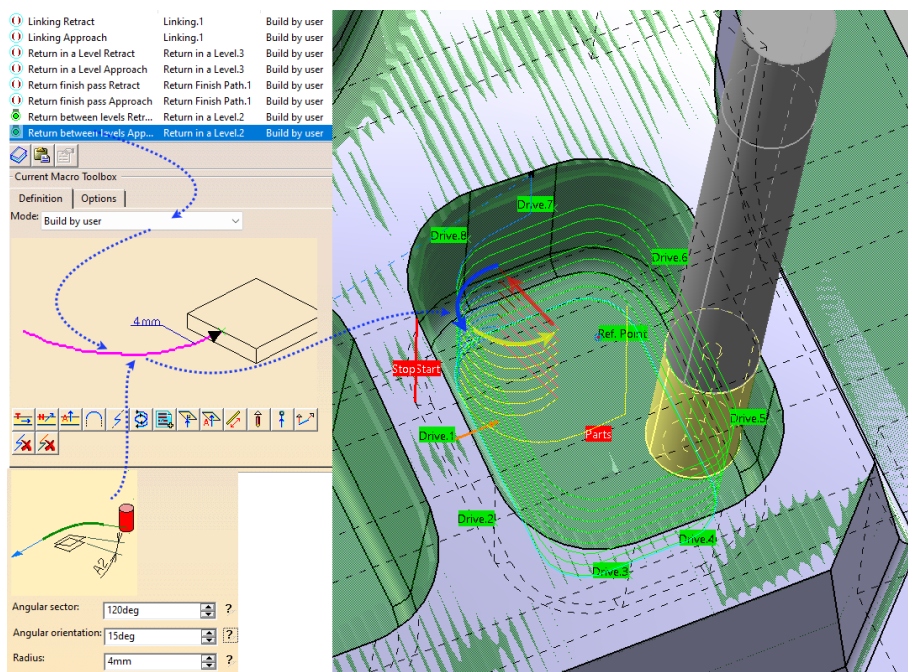


лазно и излазно кретање из материјала, сачуване су као кориснички-дефинисани узорни примери путања и, касније, искоришћене за брзо моделирање путање улаза алата у сваки следећи слој материјала (ка новом аксијалном пролазу), као и за сваки излаз.



**Слика 3-85** Ортогонални погледи на путању алата у главном и помоћном кретању приликом анимације захвата „копања џепа“.

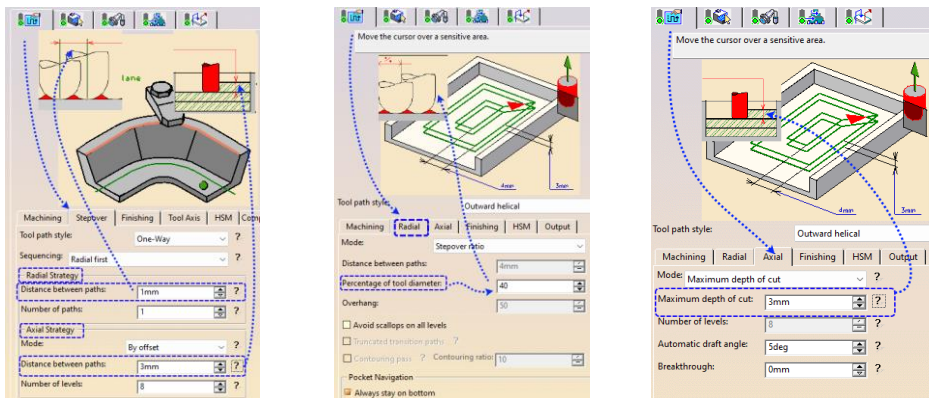
Завршна обрада бочних страна удубљења врши се 5-осном обрадом такође је захтевала моделирања помоћних кретања које омогућавају блажи прираштај сила отпора резању (Слика 3-86).



**Слика 3-86** Приказ путање алата главног и помоћног кретања алата у завршној обради нагнутих страна удубљења.

### 3.2.1.4 Технолошке одлике - параметри обраде

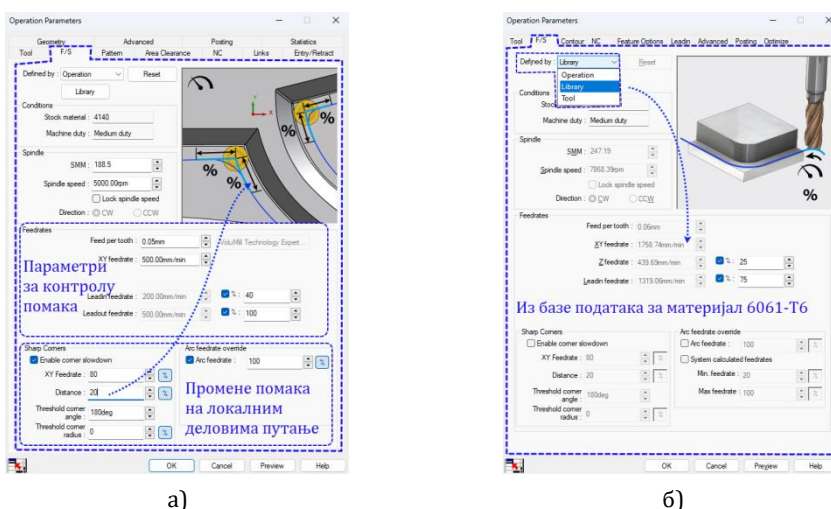
Коначно, последњи корак у поступку моделирања захвата јесте одређивање технолошких одлика захвата у које убрајамо, превасходно, брзину резања, помак и дубину резања. Дубина резања је технолошка одлика која је непосредно у вези са геометријом путање алата и, из тог разлога, у *CAPP/CAM* апликацијама се параметри, чијим вредностима контролишемо ову одлику, често налазе у групи параметара којима се подешавају одлике релативног кретања алата и обратка. С обзиром на то да код глодања имамо две компоненте дубине резања - аксијалну дубину резања и радијалну дубину резања (коју називамо и ширином захвата), унос вредности за одговарајуће параметре, којима се контролишу одлике обрадних пролаза у аксијалном и радијалном правцу непосредно одређују дубине резања (Слика 3-87).



**Слика 3-87** Приказ уноса вредности параметара који контролишу одлике обрадних пролаза укључујући и аксијалну и радијалну дубину резања.

Помак алата, односно компонента брзине релативног кретања алата и обратка у правцу путање алата, подешава се преко вредности одговарајућих параметара, који се могу наћи у групи одлика које се тичу релативног кретања алата и обратка у захвату (Слика 3-81), али и у групи одлика које се тичу алата који ће се користити у захвату (Слика 3-47, Слика 3-49 и Слика 3-50). Такође, *CAPP/CAM* апликације омогућавају кориснику да вредност помака алата задаје посебно за сваки сегмент путање алата (Слика 3-88 -а), на пример: *брзи ход* за кретање до зоне обраде, посебна вредност помака за део путање када алат улази у материјал, *радни ход* или помак алата на делу путање где се обавља резање, затим *локални радни ход* за помак алата у појединим посебним сегментима путање где се обавља резање као што су углови, помак алата при излазу из материјала и, коначно, помак приликом напуштања зоне обраде. Задавање помака и брзине резања се може обавити непосредно, уносом

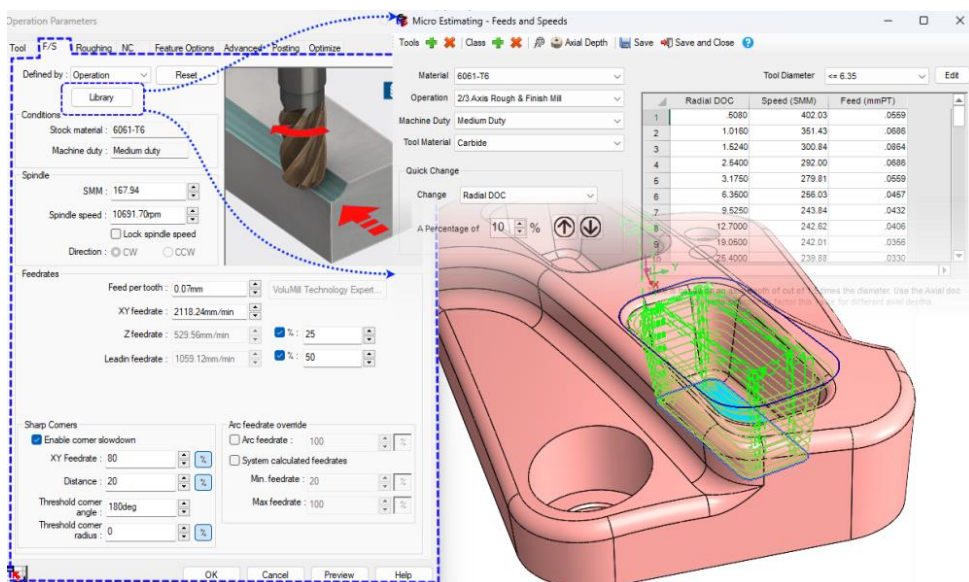
вредности за одговарајуће параметре који одређују ове технолошке одлике за захват који се моделира, а могу се и преузети из препорука, које се налазе у придруженим базама података о алатима и технологији резања за одређене комбинације материјала алата и обратка (Слика 3-88 -б, Слика 3-89 и Слика 3-90). Као што је већ било поменуто, савремене *CAPP/CAM* апликације интегришу велике базе знања и базе података о технологији резања чиме се кориснику омогућава да веома брзо дође до вредних података и препорука о алатима и режимима обраде (види поглавље 3.1.3 и слике од Слика 3-25 до Слика 3-28).



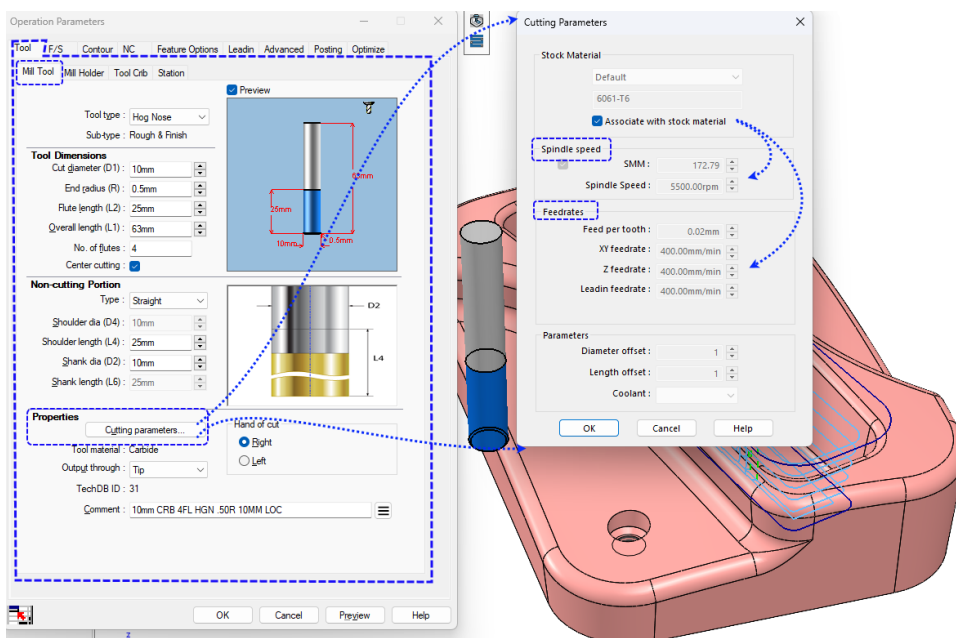
**Слика 3-88** Приказ задавања технолошких параметара у *CAM* модулу SolidWorks PLM софтвера: (а) вредност помака за све сегменте путање алата, (б) вредности параметара технолошких одлика захвата се учитавају из базе података о препорукама технолошких одлика резања за дати материјал.

Параметар за брзину резања се по правилу налази у групи технолошких одлика захвата и он се може унети непосредно или се учитава из библиотека препорука, које су или придодате подацима о алату који је изабран да се користи у захвату, или се налазе у посебним базама података и препорука (Слика 3-90 и Слика 3-91)<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Подсећања ради, брзина резања је релативна брзина између алата и обратка и у уобичајеним околностима резања, њена тангенцијална компонента (обимна брзина резне ивице глодала) доминантна је у односу на радијалну компоненту (у правцу путање), тзв. помак алата. Из тог разлога у свим *CAPP/CAM* апликацијама се на основу ње срачунава број обртаја главног вретена, односно обртног алата (глодала)  $n[\text{o/min}] = v_c [\text{m/min}] \cdot 1000 / (D[\text{mm}] \cdot \pi)$ . Као што је већ објашњено (Слика 3-66), реална тангенцијална компонента релативне брзине кретања алата и обратка у тачки контакта зависи од одстојања тачке у којој се срачунава та брзина од осе обртања.

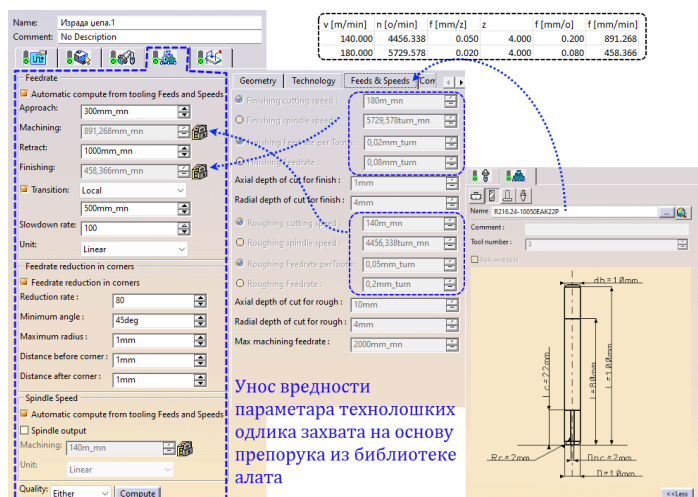


**Слика 3-89** Подешавање технолошких одлика из уграђене библиотеке (базе података) препорука за комбинације дубине и брзине резања и помака спрам изабраног материјала обрадк, материјала алата и врсте обраде. CAM модул SolidWorks PLM софтвера.



**Слика 3-90** Приказ аутоматског уписа вредности помака (за радни ход и друге сегменте путање алата) и брзине резања из библиотеке препорука за дати алат и материјал обрадк. CAM модул SolidWorks PLM софтвера.

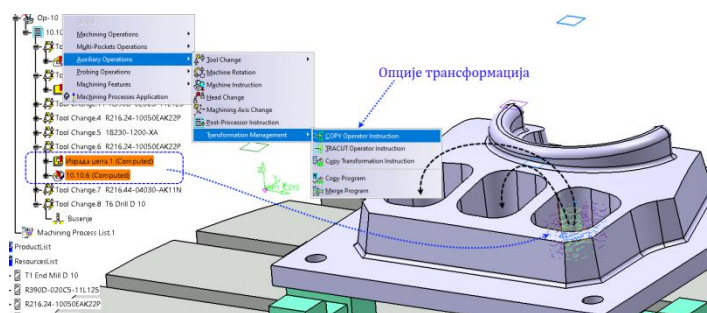




Слика 3-91 Приказ подешавања технолошких одлика захвата на основу препоручених вредности режима резања за алат који је изабран за обављање захвата. CAM модул Catia PLM.

### 3.2.1.5 Геометријске трансформације и низови захвата

Приликом моделирања операција обраде постоји потреба да се поједини претходно измоделирани захвати копирају у једном или више примерака. То су случајеви када се, на пример, жели исти захват („копања џепа“) поновити више пута, односно онолико колико таквих џепова на изратку има (Слика 3-92). Низови захвата<sup>20</sup> су, заправо, више-струке копије истог захвата према распореду који је одређен начином пресликавања (нпр. транслаторним или ротационим пресликавањем или уз помоћ табеле).

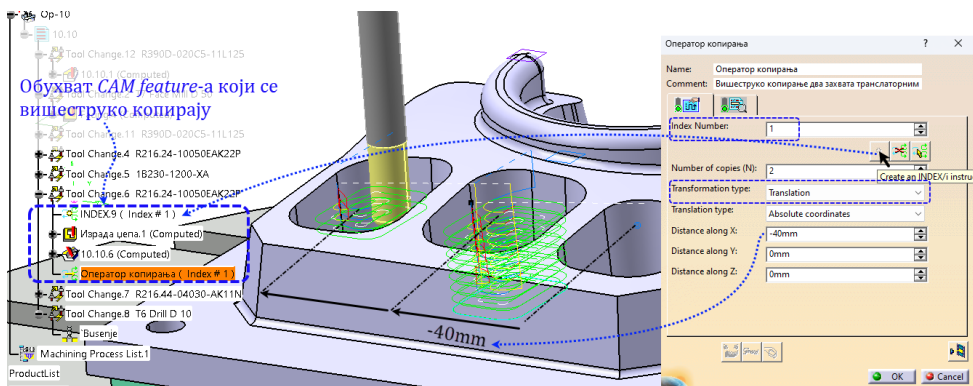


Слика 3-92 Приказ започињања поступка вишеструког копирања два захвата (копање џепа и завршна обрада нагнутих страна џепа) транслаторним пресликавањем.

<sup>20</sup> Уређени низ или тзв. *pattern* се може односити не само на геометријско-техничке елементе (CAD feature) већ и захвате и операције.

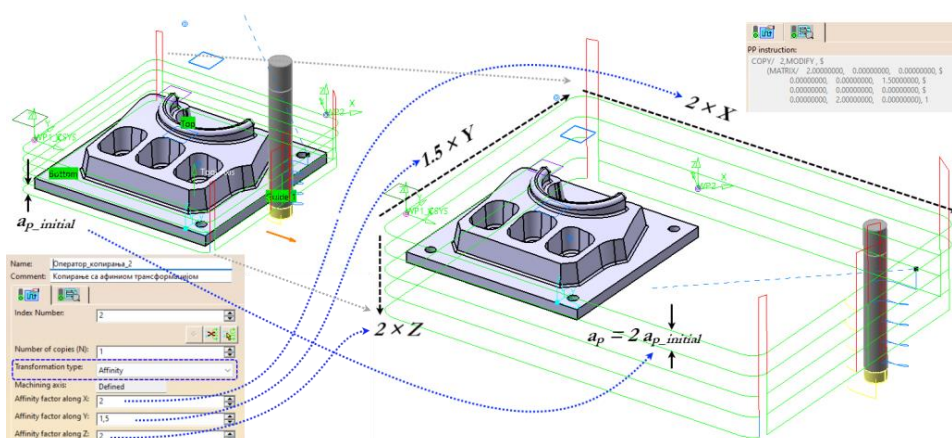
Копирање захвата обраде (који се могу сматрати неком врстом *CAM feature*), као и у случају геометријско-техничких елемената (*CAD feature*), може бити изведено применом познатог скупа геометријских трансформација:

1. симетрично пресликавање (копирање путање алата „у огледалу”);
2. транслаторно пресликавање (копирање путање алата транслацијом);
3. ротационо пресликавање (копирање путање алата ротацијом);
4. афино пресликавање (копирања путање алата уз увећање или умањење у изабраним осама, односно правцима). Специјални случај ове трансформације је *скалирање* (копирање путање алата уз исто увећање или умањење у свим осама);
5. матрично пресликавање (копирања путање алата у више праваца уз афину трансформацију) и
6. пресликавање по вектору трансформације координатних система израдака, односно припремака  $[WiWj]$  (тзв. копирање „оса-на-осу”).



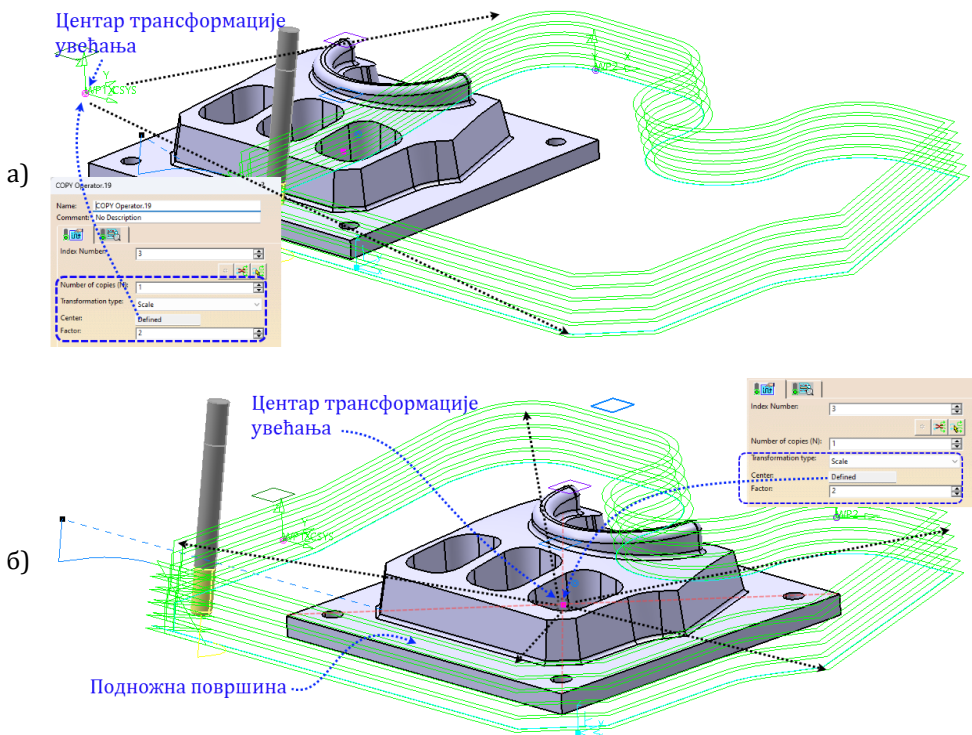
**Слика 3-93** Приказ поступка вишеструког копирања захвата у низу према транслаторном пресликавању у правцу једне -X осе.

Код ових трансформација је битно разумети да се одлике пресликавања, попут увећања или умањења, односе само на путању алата, а не и на остале одлике захвата. Другим речима, приликом трансформације увећања не долази до увећања алата или брзине резања или помака. Иако у основи технолошка одлика захвата, дубина резања, истовремено представља и одлику путање алата и, из тог разлога, она трпи промену услед примене одговарајућих трансформација. Тако, дубине резања у радијалном и аксијалном правцу бивају увећане, или умањене, или деформисане у складу са одликама пресликавања.



Слика 3-94 Копирање захвата према афином пресликавању.

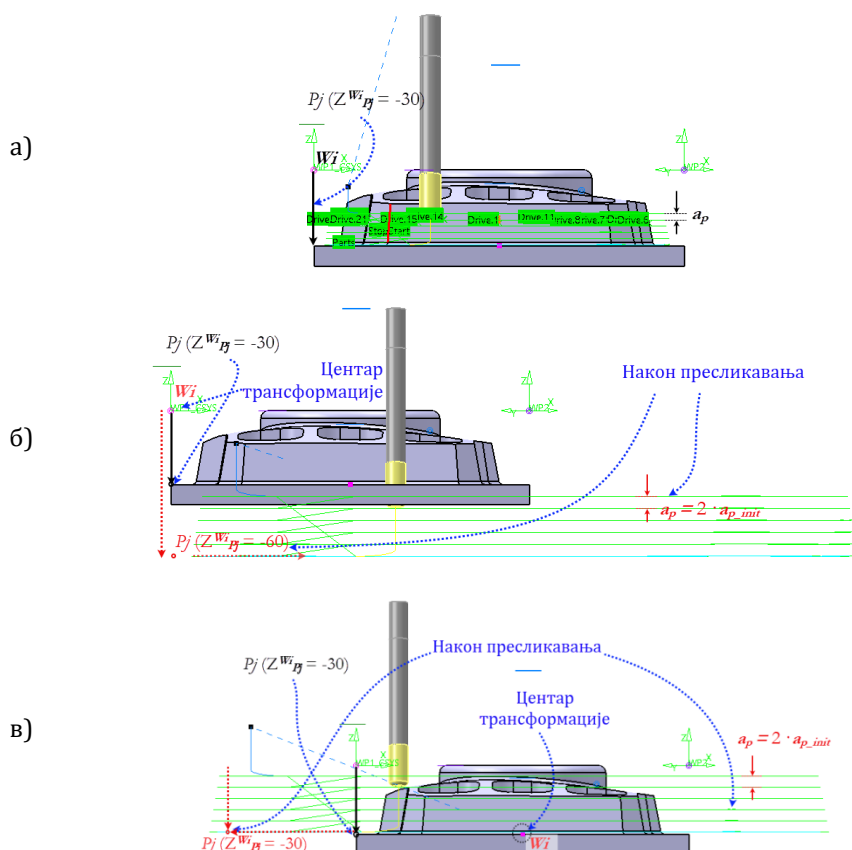
Приликом неке од трансформације са увећањем и умањењем, потребно је обратити посебну пажњу на тзв. *центар трансформације* или координатни почетак трансформације  $P_{CF}$ . Центар трансформације је референтна тачка у односу на коју се врши трансформација координата тачака путање алата. Вредности координата тачака путање алата исказане релативно у односу на *центар трансформације* биће оне које ће се множити фактором увећања или умањења. Тако тачка са путање алата  $P_i$  која је имала координате  $(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})$  приликом трансформације увећања са фактором (коефицијентом) увећања 2 имаће координате  $(X_{20}, Y_{20}, Z_{20})$  под условом да је  $W_i$  узета као *центар трансформације* ( $W_i \equiv P_{CF}$ ). Ако се пак узме да је центар трансформације у тачки  $P_{CF}$  која је на последњем нивоу путање алата у правцу  $Z$  осе ( $Z^{W_i}_{P_{CF}} = -30$ ), са истим фактором увећања (2)  $Z$  координате тачака последњег нивоа путање алата  $P_j$  ( $Z^{W_i}_{P_j} = -30$ ) имаће након трансформације исту вредност координате  $Z^{W_i}$ , јер је релативно одстојање  $P_j$  у односу на  $P_{CF}$  у  $Z$  правцу једнако нули,  $Z^{P_{CF}}_{P_j} = 0$ , те ће производ  $2 \cdot Z^{P_{CF}}_{P_j}$  бити једнак нули. Дакле, координата  $Z^{W_i}_{P_j}$  имаће ону исту вредност коју је имала и пре трансформације.



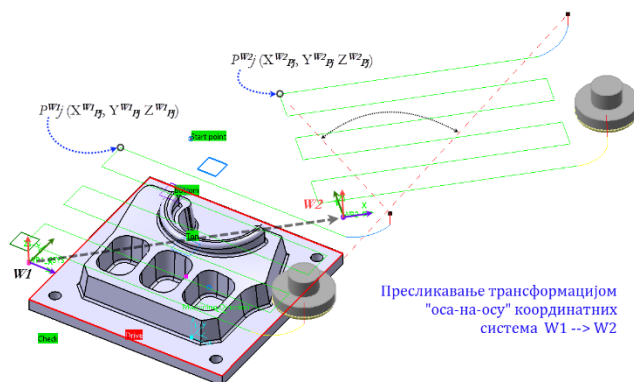
**Слика 3-95** Приказ утицаја избора тачке центра трансформације на примеру пресликавања путање алата скалирањем са истим фактором увећања путање 2. У примеру (а), за центар трансформације је изабран координатни почетак координатног система издатка. У случају (б) центар трансформације је тачка у пресеку дијагонала на подножној површини модела плоче.

На ортогоналним приказима у сликама (Слика 3-96 -а, -б, -в) јасно се види утицај центра трансформације на позиционирање путање алата, али, такође, види се и утицај коефицијента увећања на увећање одстојања између радијалних и аксијалних пролаза, односно увећање радијалне и аксијалне дубине резања.

У пракси се често може указати потреба за пресликавањем трансформацијом „оса-на-осу“ када се исти захват жели у истој размери пресликати у други координатни систем. Ово је у случају када се на истој машини, у исто време, ради више истих израдака, а радни сто машине омогућава да се на њему стегне већи број комада припремака. Тада је могуће искористи ову трансформацију за ефикасно пресликавање захвата или читаве операције. У овој трансформацији координате тачака путање алата се једноставно копирају из једног у други координатни систем.

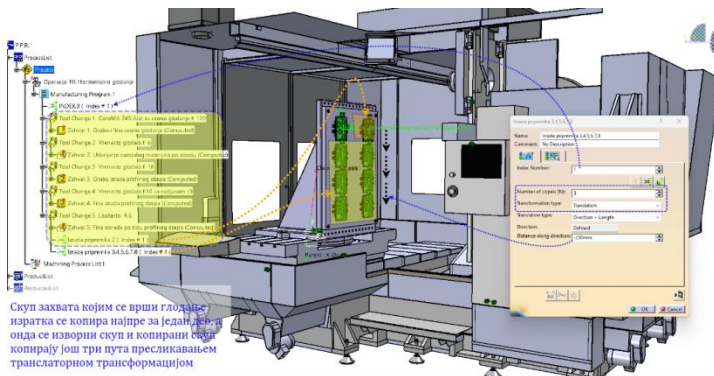


**Слика 3-96** Упоредни приказ изворне путање алата (а) и путања добијених пресликавањем трансформацијом скалирања, али са различитим центрима трансформације: (б) у  $W_i \equiv P_{CF}$ , и (в) у тачки у центру подножја издатка.



**Слика 3-97** Приказ пресликавања захвата чеоног глодања трансформацијом „оса-на-осу” са координатног система  $W_1$  на  $W_2$ .

Пресликавање се може односити не само на захват, већ и на целу операцију, односно изабрани скуп захвата, укључујући и већ ископирани захват (Слика 3-98 и Слика 3-99).



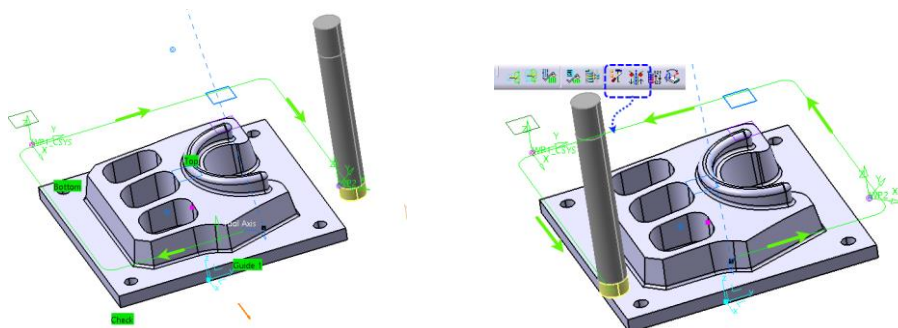
**Слика 3-98** Приказ корак у припреми вишеструког копирања скупа захвата транслаторним пресликавањем.



**Слика 3-99** Приказ копираних путања алата целе операције глодања.

Треба знати још један детаљ у вези са пресликавањем захвата и операција. Приликом пресликавања операција и захвата смер кретања алата по пресликаној путањи алата, приликом пресликавања, остаје онакав какав је био и код изворног захвата. Ипак, у случају када се то захтева, могуће је експлицитно применити промену смера кретања алата по пресликаној путањи (*Opposite Hand Machining*). Ова опција је посебно повољна када се обрађују облици који „стоје као у огледалу” (лева и десна форма). У тим случајевима је могуће не само пресликати путању алата, већ то исто урадити и са смером кретања алата и тиме осигурати огледалну трансформацију текстуре површине издатка која настаје као траг кретања алата (Слика 3-100).

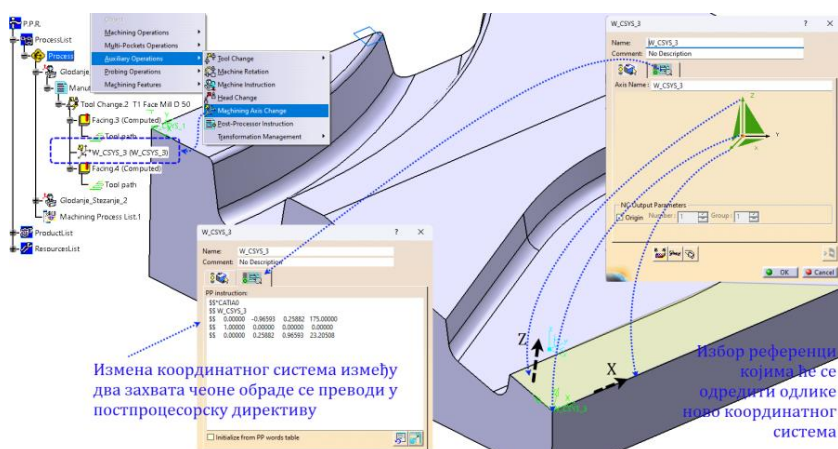




**Слика 3-100** Пресликавање путање са експлицитним захтевом за обрнутим смером обилажења алата око путање у односу на изворни захват.

### 3.2.1.6 Промена координатног система у току операције

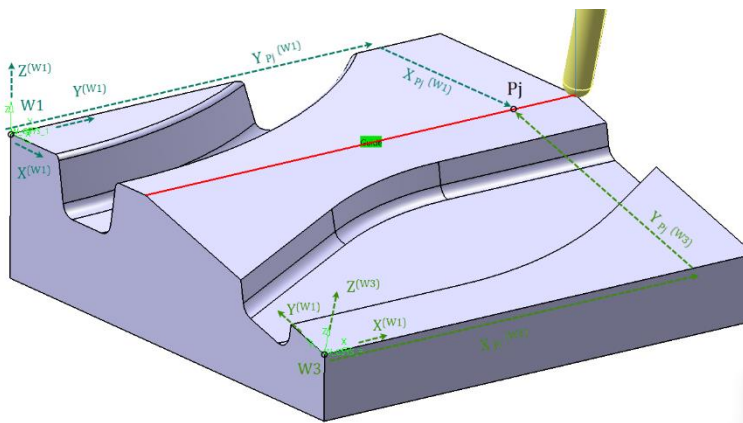
Једна од битних и релативно честих трансформација које се јављају у току моделирања операција обраде јесте промена координатног система. Ово је посебно важно за рад на НУ машинама којима је могуће радити тзв. 4-страну и 5-страну обраду. О томе је већ било речи у поглављу 3.1.2 и на сликама (Слика 3-14 Слика 3-15). Оно што је овде остало да се спомене јесте да та промена координатног система не мора обавезно да прати промену стезања. Промена позиције координатног почетка координатног система захвата (и операције) у односу на израдак, као и промена оријентације оса координатног система може се захтевати и између обављања два захвата. У основи, могуће је променити све одлике координатног система, али и само оријентацију неке од оса постојећег координатног система.



**Слика 3-101** Приказ корака подешавања одлика новог координатног система уметнутог између два захвата у истој операцији.



Важно је уочити да ће координате тачака путање алата оних захвата који следе након измене координатног система бити изражене у извршном коду у односу на тај нови координатни систем. Наравно, пре тога, у извршном коду ће се наћи инструкција измене координатног система. На слици (Слика 3-102) је приказана тачка  $P_j$  на путањи алата (у захвату вођења алата према линији водиљи), која ће имати различите координате у извршном коду у зависности да ли је пре пројектованог захвата обављена измена координатног система са  $W1$  на  $W3$  или не (важећи систем је  $W1$ ). На слици (Слика 3-103), су приказани извршни кодови истог захвата, на којима се јасно види разлика у координатама тачака путање алата (која је иста у односу на израдак), изражени у једном и другом координатном систему.



Слика 3-102 Координате исте тачке  $P_j$  на изратку изражене у односу на  $W1$  и  $W3$ .

```

PARTNO Glodanje_Stezanje_1
$$ OPERATION NAME : Tool Change.4
$$ Start generation of : Tool Change.4
TLAXIS/ 0.000000, 0.000000, 1.000000
$$ CATZAD
$$ W_CSYS_3
$$ 0.00000 -0.96593 0.25882 175.00000
$$ 1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 0.25882 0.96593 23.20508
$$ End of generation of : W_CSYS_3
$$ OPERATION NAME : Tool Change.4
$$ Start generation of : Tool Change.4
$$ TOOLCHANGEBEGINNING
CUTTER/ 10.000000, 5.000000, 0.000000, 5.000000, 0.000000,$
0.000000, 50.000000
TOOLNO/2,MILL,2,0, 10.000000, 100.000000,$
100.000000, 100.000000, 60.000000, 50.000000,$
1000.000000,MMPM, 70.000000,RPM,CLW,$
ON, NOTE
TPRINT/T2 End Mill D 10,T2 End Mill D 10,T2 End Mill D 10
LOADTL/2,2,2
$$ TOOLCHANGEEND
$$ End of generation of : Tool Change.4
$$ OPERATION NAME : Curve Following.1
$$ Start generation of : Curve Following.1
LOADTL/2,1
TLAXIS/ 0.258819, 0.000000, 0.965926
FEDRAT/ 300.0000,MMPM
SPINDL/ 70.0000,RPM,CLW
GOTO / 75.00000, 175.00000, 78.82848
GOTO / 75.00000, 175.00000, 0.00000
FEDRAT/ 1000.0000,MMPM
GOTO / 75.00000, 0.00000, 0.00000
FEDRAT/ 300.0000,MMPM
GOTO / 75.00000, 0.00000, 78.82848
$$ End of generation of : Curve Following.1
FINI

```

a)

```

PARTNO Glodanje_Stezanje_1
$$ OPERATION NAME : W_CSYS_3
$$ Start generation of : W_CSYS_3
TLAXIS/ 0.000000, 0.000000, 1.000000
$$ CATZAD
$$ W_CSYS_3
$$ 0.00000 -0.96593 0.25882 175.00000
$$ 1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 0.25882 0.96593 23.20508
$$ End of generation of : W_CSYS_3
$$ OPERATION NAME : Tool Change.4
$$ Start generation of : Tool Change.4
$$ TOOLCHANGEBEGINNING
CUTTER/ 10.000000, 5.000000, 0.000000, 5.000000, 0.000000,$
0.000000, 50.000000
TOOLNO/2,MILL,2,0, 10.000000, 100.000000,$
100.000000, 100.000000, 60.000000, 50.000000,$
1000.000000,MMPM, 70.000000,RPM,CLW,$
ON, NOTE
TPRINT/T2 End Mill D 10,T2 End Mill D 10,T2 End Mill D 10
LOADTL/2,2,2
$$ TOOLCHANGEEND
$$ End of generation of : Tool Change.4
$$ OPERATION NAME : Curve Following.1
$$ Start generation of : Curve Following.1
LOADTL/2,1
TLAXIS/ 0.258819, 0.000000, 0.965926
FEDRAT/ 300.0000,MMPM
SPINDL/ 70.0000,RPM,CLW
GOTO / 175.00000, 123.92993, 76.14247
GOTO / 175.00000, 103.52762, 0.00000
FEDRAT/ 1000.0000,MMPM
GOTO / 0.00000, 103.52762, 0.00000
FEDRAT/ 300.0000,MMPM
GOTO / 0.00000, 123.92993, 76.14247
$$ End of generation of : Curve Following.1
FINI

```

b)

Слика 3-103 Приказ извршног кода истог захвата у АРТ формату и разлике у координатама тачака путање алата: (а) када је  $W1$  важећи координатни систем и (б) када је  $W3$  важећи координатни систем.

### 3.2.2 МОДЕЛИРАЊЕ ОПЕРАЦИЈА КОНТУРНИХ СЕЧЕЊА

Код поступака контурног сечења материјала, попут електро-ерозионог сечења електродом у облику жице, јавља се потреба за моделирањем захвата и операција контурног сечења помоћу *CAPP/CAM* апликација. У већини случајева, моделирање ове врсте операција сматра се једноставним због тога што је геометрија путање „алата” релативно једноставна, односно, ради се о дводимензионалној контури која може бити састављена из више линијских и криволинијских елемената. Из тог разлога, у пракси се за моделирање ових операција најчешће користе *CAPP/CAM* апликације које су инсталиране на управљачким јединицама НУ машина. У основи постоје два приступа моделирања контуре:

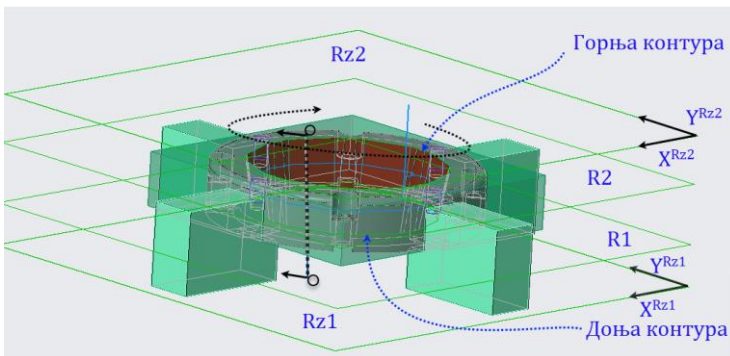
1. да се геометријски модел контуре (најчешће дат у *dxg* формату) „уведе” или учита у *CAPP/CAM* апликацију, која је инсталирана на управљачкој јединици НУ машине, а затим обаве минималне промене геометрије контуре<sup>21</sup>;
2. да се геометријски модел контуре формира уз помоћ *CAD* модула за исцртавање контуре, којим су све *CAPP/CAM* апликације, инсталиране на управљачкој јединици НУ машине за контурно сечење, опремљене.

Моделирање 2D контура, које се користе код операција тзв. 2-осног контурног сечења, изучава се у оквиру предмета *Програмирање НУМА 1*, а подешавање оптималних технолошких параметара - у оквиру предмета *Неконвенционалне методе*, тако да се очекује од студената да овај садржај познају. Управо из тог разлога, у овом уџбенику пажња ће бити посвећена искључиво моделирању тзв. 4-осног контурног сечења електро-еродирањем материјала бакарном или месинганом електродом у облику жице (која има улогу алата „сечења” у овој врсти операције обраде). У случају да је потребно да зидови изратка, настали исецањем, буду нагнути у односу на раван у којој се формира 2D контура, неопходно је контролисати нагиб жице или „алата” који обавља сечење. Скоро по правилу, то се обавља коришћењем две дводимензионалне контуре формиране у две паралелне равни R1 и R2, једна испод и друга изнад обратка. Кретање затезача жице за сечење одвија се у две равни паралелне овим двама равнима Rz1 и Rz2, тако да жица пролази кроз одговарајуће тачке дводимензионалних контура дате у равнима R1 и R2. У првој равни кретање затезача жице се одвија у два правца:  $X^{Rz1}$  и  $Y^{Rz1}$ , а у другој равни

---

<sup>21</sup> Обично се треба изабрати тачка или тачке почетка и краја обиласка контуре.

такође, у два правца:  $X^{Rz2}$  и  $Y^{Rz2}$  (Слика 3-104). Дакле, истовремено се управља кретањем два затезача жице у две паралелне равни и то синхронно у правцима две осе. Ово контурно сечење се, из тог разлога, назива 4-осном обрадом (видети поглавље 2.1 и слику Слика 2-4). Треба имати на уму да се контурно сечење електро-еродирањем материјала жицом изводи на НУ машинама за електро ерозиону обраду – тзв. „ерозиматима са жицом” (Wire Electric Discharge Machining - Wire EDM) који се, по правилу, израђују са комором за потапање изратка, тзв. *кадом* или *купатилом* у коме је расхладни флуид. Због тога је НУ *ерозимат са жицом* скоро увек оријентисан тако да је Z-оса усмерена у усправном (вертикалном) правцу док су X- и Y- осе положене водоравно (хоризонтално). С тим у вези, треба разумети да је и обрадак током операције еродирања оријентисан и стегнут тако да омогућава несметано кретање затезача жице у једној или две хоризонталне равни.

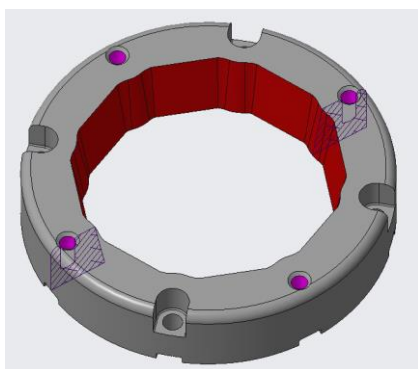


**Слика 3-104** Приказ равни у којима се формирају контуре и у којима се крећу затезачи електроде у облику жице.

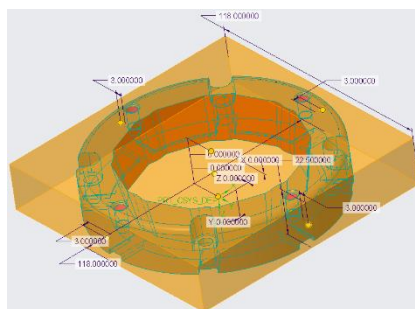
### 3.2.2.1 Производни склоп и избор машине

У основи, поступак моделирања операције и захвата контурног сечења је исти као и код већ описаног поступка моделирања операције глодања. Најпре је неопходно формирати производни склоп, а потом одредити одлике машине и алата. Пример на слици (Слика 3-104) приказује склоп изратка, припремка и стезне клеме упрошћених геометрија. Израдак је кружна плоча коју одликује низ сложених површина на унутрашњој страни, нагнутих у односу на водоравне чеоне стране (Слика 3-105 -а). Геометрија припремка се може формирати непосредно у *CAPP/CAM* апликацији избором параметара запремине која обухвата израдак (Слика 3-105 -б). Имајући у виду да припремак који долази на електроерозиону обраду контурног сечења жицом веома често захтева претходну машинску обраду. У таквим случајевима је целисходније да се модел претходно обрађеног припремка измоделира у *CAD* апликацији

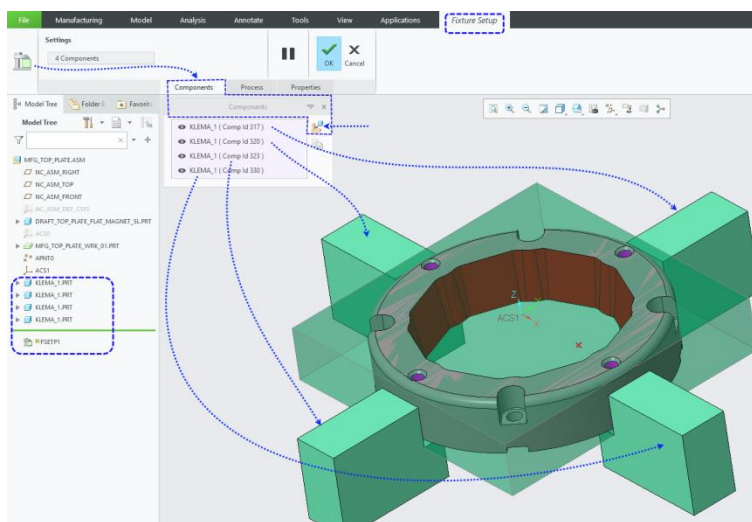
како би верно представио модел који ће се користити у симулацији и анимацији моделиране операције. У последњем кораку изградње производног склопа следи уметање елемената стезног алата и прибора који, такође, помаже да се детаљније визуелизује моделирана операција обраде (Слика 3-105 -в). Да би *CAPP/CAM* апликација понудила алате за моделирање операције контурног сечења, потребно је да се изабере одговарајућа врста машине из листе понуђених (у овом примеру бира се 4-осно контурно сечење електро-еродирањем материјала жицом), а потом је могуће, или изабрати неку од машина из збирке већ спремљених машине те класе, или тада извршити подешавања одлика потребне машине.



а)



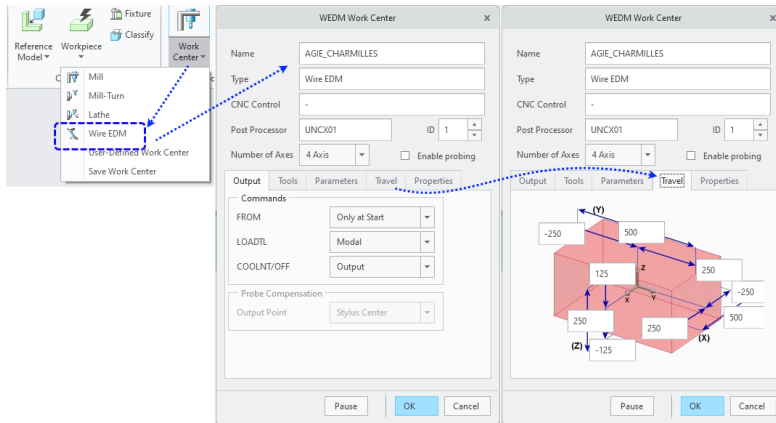
б)



в)

**Слика 3-105** Приказ компоненти производног склопа геометрије:  
(а) изратка, (б) секвенца формирања припремка и  
(в) уметања геометрије стезних клема.

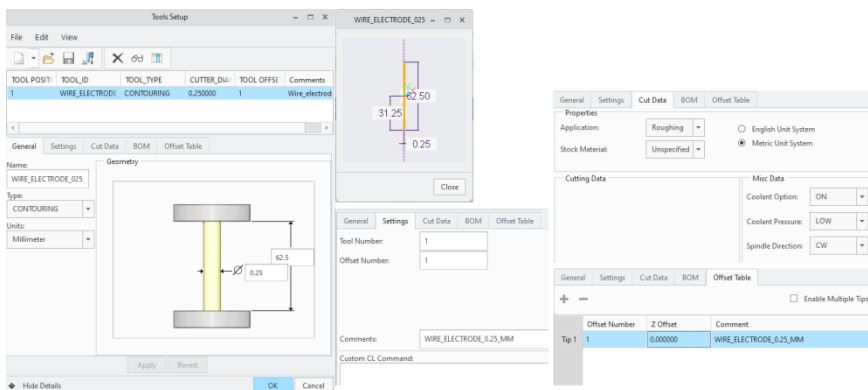
Подешавање одлика машине за 4-осно контурно сечење не разликује се много од подешавања других врста НУ машина (глодалица, стругова) (Слика 3-106). У овом случају се користи посебан алат, односно електрода у облику жице.



Слика 3-106 Приказ секвенце избора машине и подешавања њених одлика.

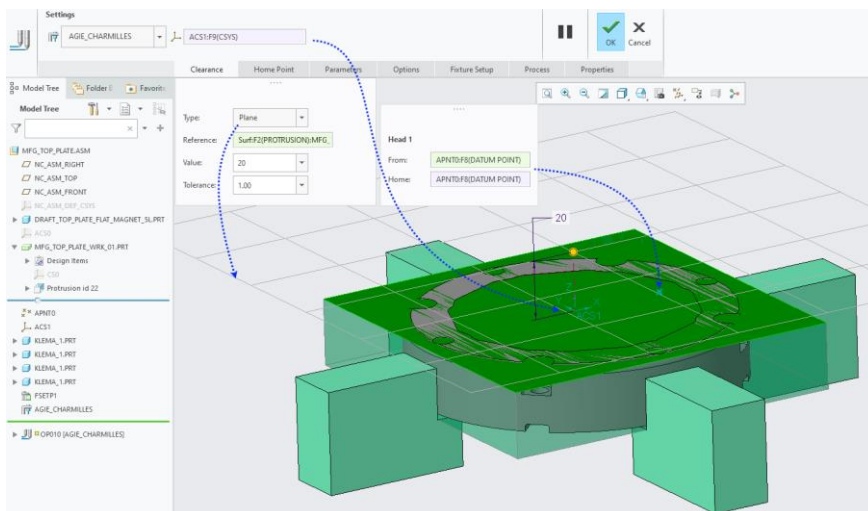
### 3.2.2.2 Одлике алата

Када говоримо о одликама алата, овде је превасходно реч о једином параметру алата - пречнику жице која се користи у захвату. Жица се обично прави од месинга или вишеслојне бакарне жице чији пречник се креће од 0,02 до 0,35 mm. Свако електрично пражњење између жице и обратка које се дешава у зони обраде одваја делове материјала, како на обратку, тако и на жици услед чега долази до хабања или трошења волумена жице у току обраде. Технолошки параметар трошења алата је повезан са одликом која се може подешавати у *CAPP/CAM* апликацији или директно на машини, а ради се о брзини повлачења жице из зоне обраде.



Слика 3-107 Приказ подешавања одлика алата – електроде у облику жице.

Формирање операције се завршава избором координатног система операције, равни кретања затезача алата и тачака из којих ће електроде (уколико их у операцији има више од једне – за више захвата) кретати у захват сечења и враћати се из њих.



**Слика 3-108** Приказ завршног подешавања одлика операције контурног сечења у CAM модулу Creo PLM софтвера.

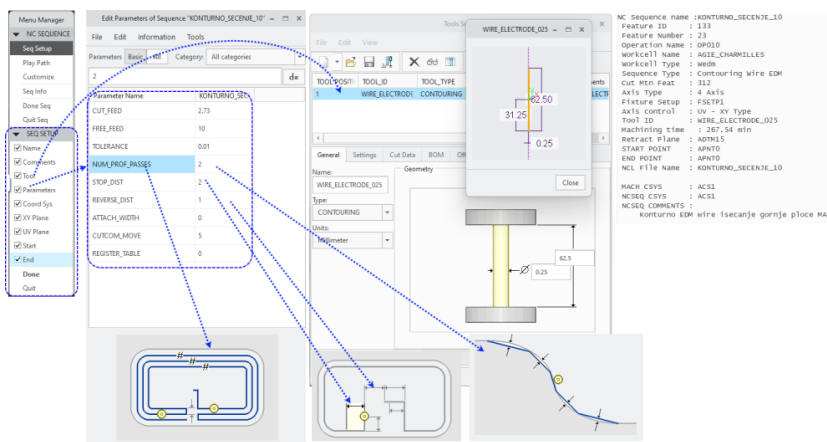
Захват контурног сечења започиње избором варијанте захвата које нуди CAPP/CAM софтвер. У општем случају постоје три врсте захвата контурног сечења на ерозимату са жицом:

1. 2-осно контурно сечење где електрода прати 2D контуру (у равни);
2. 4-осно контурно сечење где електрода прати 2D контуру (у равни), али држи непроменљив угао нагиба и
3. 4-осно контурно сечење где електрода прати две 2D контуре у две равни које могу, али и не морају бити тополошки исте (да имају исти облик и број елемената контуре).



**Слика 3-109** Избор варијанти захвата контурног сечења електро-еродирањем материјала електродом у облику жице.

У примеру који користимо да прикажемо моделирање ове врсте захвата, бирамо захват за 4-осно контурно сечење између две контуре. У *CAM* модулу *Creo PLM* софтвера, редослед корака при избору одлика нешто је другачији у односу на *Catia* или *SolidWorks*, али су кораци исти: подешавају се одлике изабраног алата, подешавају се технолошке одлике и одлике релативног кретања електроде и обратка пре избора обрадне геометрије попут помака, дозвољеног одступања путање од идеалне криве услед дискретизације кретњи по *X* и *Y* правцу, броја пролаза (нпр. ако постоји потреба за завршним пролазом за добијање површина мање храпавости), затим одговарајућих одстојања којима се одликује путања електроде у зони уласка у контуру и изласка из контуре (Слика 3-110).



**Слика 3-110** Подешавање одлика алата (електроде - жице) и одлике релативног кретања алата и обратка.

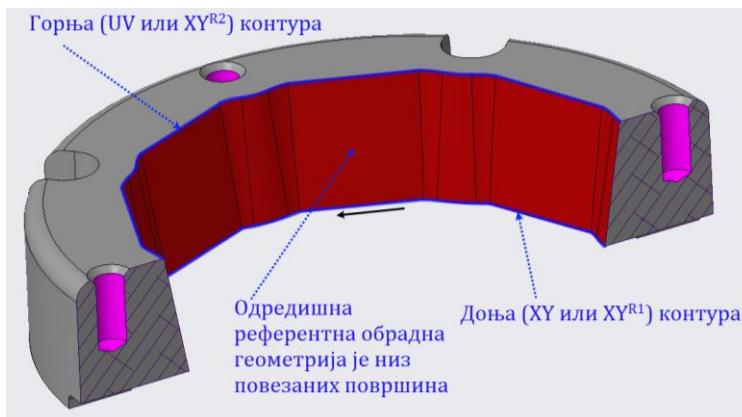
Након подешавања ових параметара, следи избор координатног система који ће бити важећи за тренутно моделирани захват и подешавање одлика обрадне геометрије (главних контура, референтних равни и тачака започињања и завршетка кретања електроде (жице).

### 3.2.2.3 Обрадна геометрија захвата

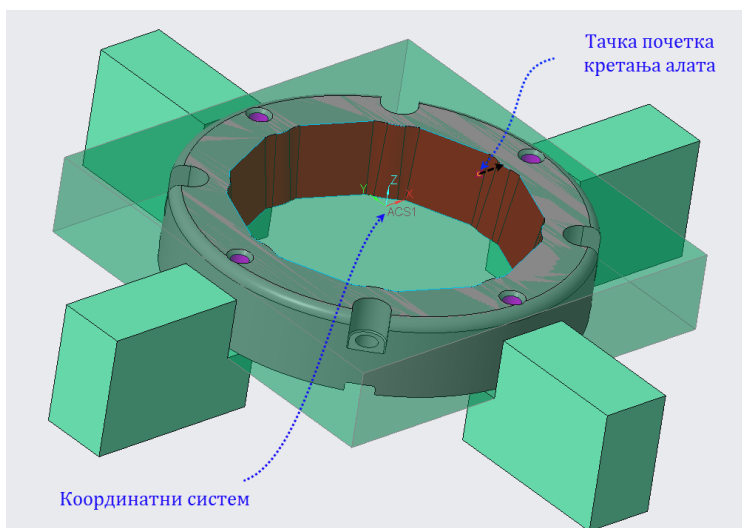
Одређивање обрадне геометрије захвата 4-осног контурног сечења се обавља избором референтних дводимензионалних контура или исцртавањем нових контура у тренутку моделирања захвата. У неким *CAPP/CAM* апликацијама, попут *CAM* модула *Cut4Axis* *Catia PLM* софтвера или *CAM* модула *NX PLM* решења, могуће је бирати низ страница на изратку које треба да се добију након сечења. Такав избор је комфорнији јер инжењер не мора да брине о контурама и њиховом распореду, већ је довољно оријентисати део и изабрати странице. Ипак, чешће се те контуре формирају експлицитним избором скупа граничних линија и кри-



вих на једној и другој страни геометрије изратка. Уколико пак постоји потреба да се нека од тих контура измени онда је могуће интервенисати и „доцртати“ додатне или „избрисати“ постојеће елементе контуре. Те две контуре, заправо, формирају обвојну сложену површину (која се састоји од више мањих површина) која се користи као одредишна обрадна референтна површина на изратку на основу које се формира путања електроде (жице) (Слика 3-111). Као што је већ било речи о томе, 4-осно контурно сечење ерозивом са жицом намењено је површинама које су нагнуте у односу на чеоне површине изратка.

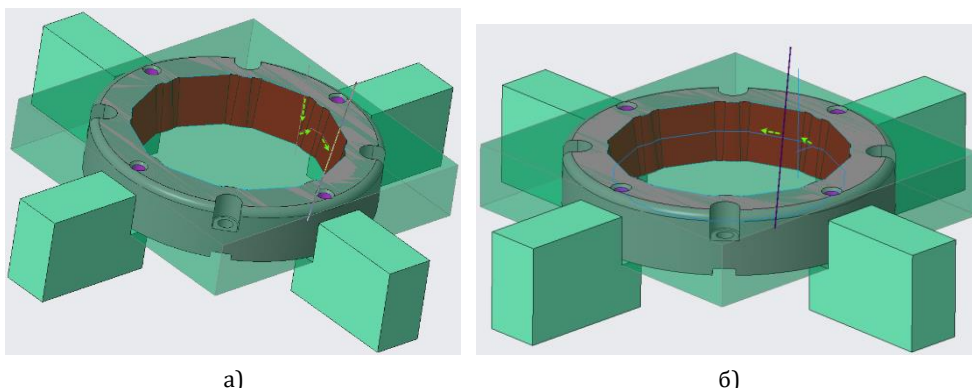


**Слика 3-111** Приказ избора ивица изратка (изометријски поглед у пресеку) за граничне контуре сложене обрадне површине чије стране нису управне на XY раван.



**Слика 3-112** Избор координатног система захвата и тачака почетка и завршетка кретање електроде.

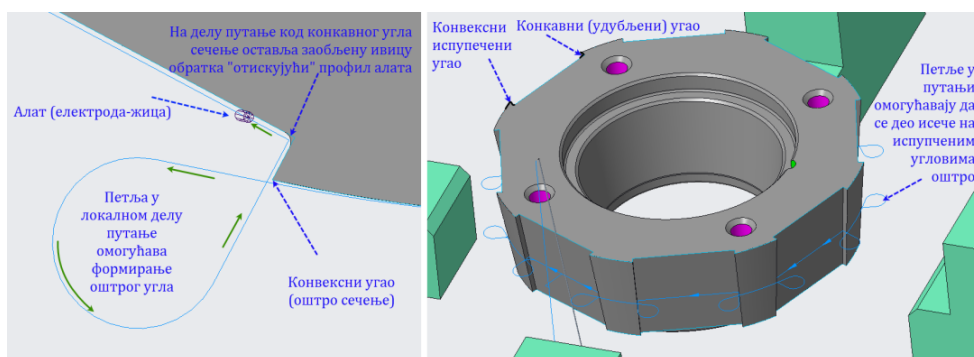
Путања алата се формира на основу изабраних контура, референтних равни, геометрије алата и подешених параметара. На сликама (Слика 3-113 -а и -б) могуће је видети да, у складу са подешеним параметрима путање, електрода „обилази“ обрадну геометрију најпре у смеру кретање казаљке на сату и на одговарајућем одстојању (одређеном вредношћу параметра *Reverse\_Dist*) пре комплетирања путање на обрадној контури се зауставља, а затим креће уназад обрнутим смером до почетне тачке обрадне контуре. (Напомена: у оваквим случајевима је потребно обезбедити одговарајуће „држање“ дела обратка који „отпада“.)



**Слика 3-113** Симулација обиласка алата око референтне обрадне површине: (а) започињање првог пролаза, (б) други пролаз се одвија у супротном смеру.

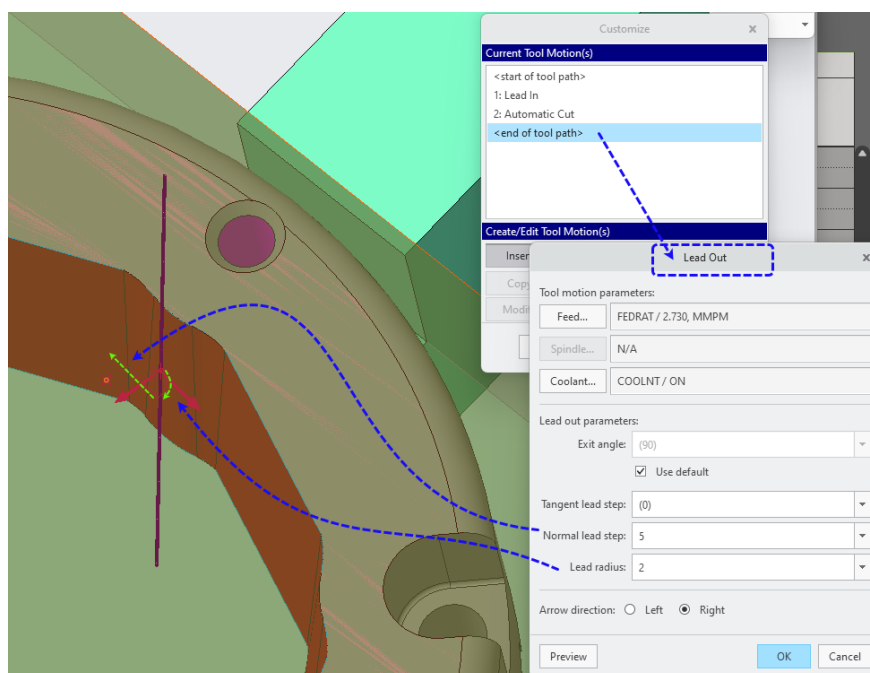
### 3.2.2.3.1 Одлике релативног кретања жице и обратка

Ако изузмемо превлачење жице преко затезача (ради уклањања потрошеног дела електроде из зоне обраде), основна компонента релативног кретања електроде-жице и обратка је кретање електроде по путањи која се формира на средишњој равни на основу две контуре обрадне геометрије. Нагиб (осе) електроде-жице прати нагиб обвојне (одређишне обрадне) површине коју формирају изабране граничне контуре. Дакле, брзина кретања је одређена *помаком* електроде који се може разликовати у зависности од материјала електроде и обратка и жељене храпавости која се жели постићи. Посебно су интересантне опције којима је могуће подешавати кретање електроде приликом сечења материјала обратка у угловима контуре, дакле, на локалним деловима главне путање алата. На пример, када се жели да формира оштра ивица материјала на испупченим (конвексним) угловима контуре, односно да се избегне формирање заобљења које формира жица због „технолошке“ компензације у радијалном правцу (полупречника жице) (Слика 3-114).



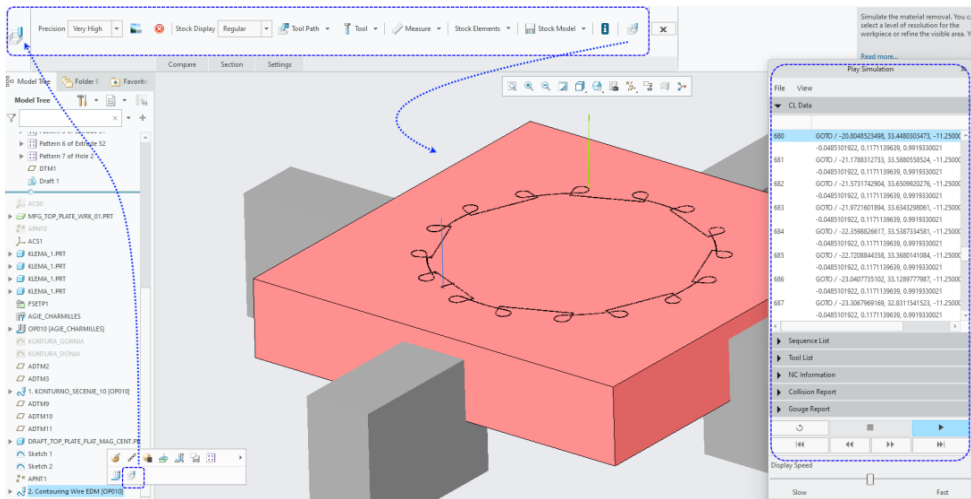
**Слика 3-114** Одлике геометрије путање на локалним деловима помажу да се добију жељени профил исецања обратка.

Поред кретања електроде по главном делу путање треба учити да *CAPP/CAM* апликације омогућавају подешавање одлика кретања електроде и на помоћним деловима путање, тзв. улазно-излазна кретања (Слика 3-115).



**Слика 3-115** Приказ подешавања одлике помоћног (улазно-излазног) кретања код контурног сечења електро-еродирањем материјала електродом у облику жице.

Симулација уклањања материјала и провера недозвољеног задирења алата у материјал изратка је последња етапа у моделирању захвата контурног сечења (Слика 3-116).



Слика 3-116 Приказ симулације уклањања материјала у захвату контурног сечења.

### 3.2.3 МОДЕЛИРАЊЕ ОПЕРАЦИЈА ОБРАДЕ СТРУГАЊЕМ

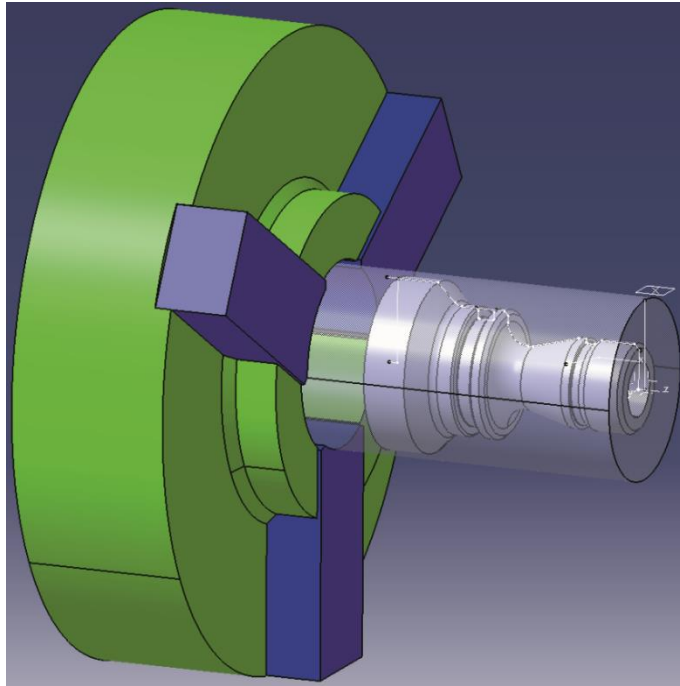
#### 3.2.3.1 Обрадна геометрија

Пре креирања операције обраде стругањем, неопходно је креирати обрадни склоп. Приликом креирања геометријских модела делова обрадног склопа треба креирати обрадне контуре, координатни систем и раван са тачком.

##### 3.2.3.1.1 Обрадни склоп (просторно-позициони односи делова у склопу и ограничења)

Обрадни склоп код стругања укључује израдак, припремак и делове који чине стезну главу (Слика 3-117). Израдак се налази унутар припремке. Припремак је најчешће полуфабрикат, попут шипке кружног или шестоугаоног попречног пресека, али може бити и део добијен неком другом методом обраде (на пример, ковањем, ливењем, ваљањем или истискивањем).

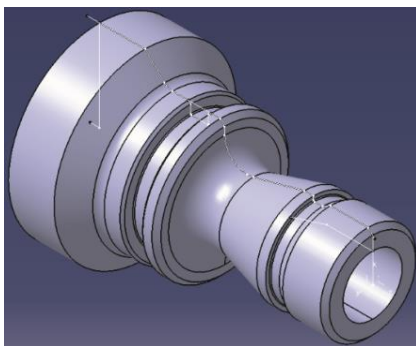
Приликом креирања обрадног склопа дефинишу се ограничења, међу којима су битна растојање између чеоне површине припремке и чеоне површине издатка, које је једнако збиру додатака за чеону обраду (евентуално заокруженом на први већи цео број) и растојање између чеоне површине припремке и најближе површине стезне шапе. Применом одговарајућег ограничења за угао треба обезбедити да све обрадне контуре буду у истој равни (радна раван  $XZ$ ) (Слика 3-117).



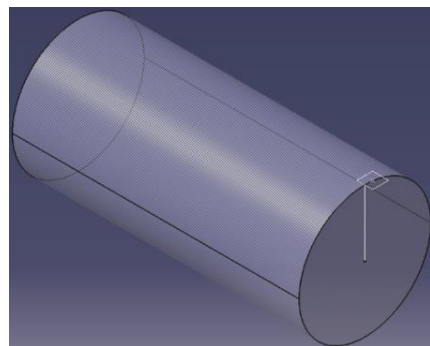
**Слика 3-117** Обрадни склоп код обраде стругањем.  
Израдак се налази унутар транспарентног припремка,  
који је стегнут у стезној глави са три стезне шапе.

### 3.2.3.1.2 *Обрадне контуре и површине*

Обрадне контуре или делови истих бирају се приликом дефинисања обрадне геометрије на нивоу захвата, којом се означава област у којој ће се вршити уклањање материјала. Креирају се у оквиру геометријских модела изратка и припремка (Слика 3-117).



а)



б)

**Слика 3-118** Обрадне контуре и координатни систем на нивоу изратка (а).  
Обрадна контура и раван са тачком на нивоу припремка (б).

Обрадне контуре у општем случају представљају низ геометријских елемената. Исте треба креирати на такав начин да накнадно буде могуће бирање појединих геометријских елемената контуре, а не само обрадне контуре као целине. Обрадна контура на нивоу припремка бира се приликом дефинисања обрадне геометрије првог захвата. На почетку креирања осталих захвата врши се ажурирање контуре обратка. Контура обратка или делови исте могу се затим бирати приликом дефинисања обрадне геометрије.

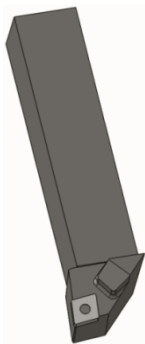
У оквиру геометријског модела издатка креира се и координатни систем (Слика 3-118 -а), који ће приликом дефинисања операције бити изабран као координатни систем обратка (*Reference machining axis system*). Све координате у оквиру команди кретања у програму за израду дела на нумерички управљаној машини, дате су у координатном систему обратка. Нулта тачка обратка је почетак овог координатног система. Иста се код стругања најчешће налази у пресеку осе осно-симетричног издатка и чеоне површине издатка. У оквиру геометријског модела припремка креира се и раван са тачком (Слика 3-118 -б). Раван ће приликом дефинисања операције бити изабрана као безбедна раван (*Safety plane*). Након измене алата, исти се брзим ходом померања креће до безбедне равни, затим се извршавају један или више захвата, након чега се алат враћа на безбедну раван и коначно се брзим ходом померања креће у тачку за измену алата. Тачка ће бити изабрана као почетна тачка (*Start point*) приликом дефинисања прилазног кретања (*Approach*) на нивоу захвата, односно крајња тачка (*End point*) приликом дефинисања излазног кретања (*Retract*) на нивоу захвата.

### **3.2.3.1.3 Геометрија алата**

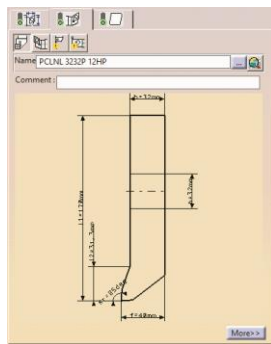
Савремени алати који се користе при обради на нумерички управљаном стругу, а који не ротирају у току обраде, спадају у групу алата са механички причвршћеним изменљивим плочицама. Стога се, приликом дефинисања геометрије ових алата, дефинишу геометрија држача и геометрија изменљиве плочице. У савременим САМ софтверским пакетима држачи се најчешће дефинишу као конвенционални (са призматичном или цилиндричном дршком). Алати који ротирају у току обраде могу бити једноделни или алати са механички причвршћеним изменљивим плочицама. У контексту дефинисања геометрије, овде ће бити поменуте завојне бургије и урезници. Завојне бургије се у савременим САМ софтверским пакетима најчешће дефинишу као једноделни алати. Све мере потребне приликом дефинисања геометрије држача, изменљивих плочица или једноделних алата могу се наћи у каталогу произвођача алата.

У даљем тексту биће описана процедура дефинисања геометрије држача, изменљивих плочица и једноделних алата који се користе код захвата обраде не стругу.

Геометријски модел алата за спољашње уздужно и/или попречно стругање са механички причвршћеном изменљивом плочицом је приказан на слици (Слика 3-119 -а). Приликом дефинисања геометрије држача, неопходно је дефинисати: да ли је у питању леви или десни држач (*Hand style*), главни нападни угао алата (*Cutting edge angle*), угао врха изменљиве плочице (*Insert angle*), дужину резне ивице изменљиве плочице (*Insert length*), грудни угао држача (*Clearance angle*), висину дршке држача (*Shank height*), ширину дршке држача (*Shank width*), дужину држача (*Shank length 1*) и две преостале дужинске и ширинске мере (дужину активног дела алата (*Shank length 2*) и функционалну ширину алата (ширину резања алата) (*Shank cut width*)) (Слика 3-119 -б и -в).



а)



б)

Geometry	Technology	Compensation
Hand style :	Left hand	
Holder capability :	Surface	
Cutting edge angle (Kr):	95deg	
Insert angle (a):	80deg	
Insert length (l):	12mm	
Clearance angle :	6deg	
Shank cut width (f):	40mm	
Shank height (h):	32mm	
Shank length 1 (l1):	170mm	
Shank length 2 (l2):	31,3mm	
Shank width (b):	32mm	

в)

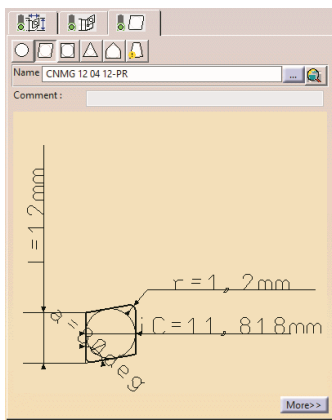
Geometry	Technology	Compensation
Type	Corrector number	
P1		
P2		
P3	3	
P4		
P5		
P6		
P7		
P8		
P9	0	
P9R		

г)

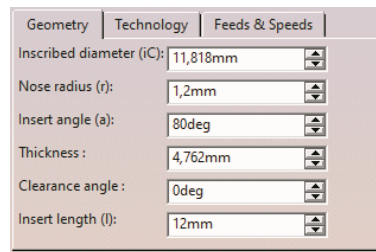
**Слика 3-119** Подешавање одлика геометрије држача алата за спољашње уздужно и/или попречно стругање: модел алата (а), подешавање параметара геометрије модела држача на приказу 2D профила (б), и путем уноса или бирања података (в), одређивање компензације врха алата (г).



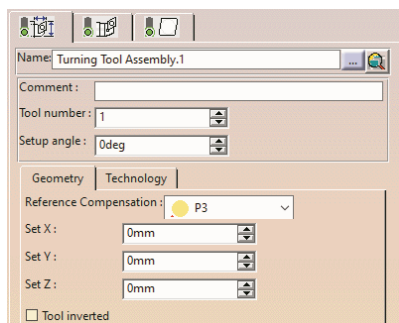
Такође је неопходно дефинисати и компензацију врха алата (*Compensation*) (у овом случају је потребно узети у обзир и оријентацију држача; претпоставка је да се носач алата налази иза/изнад осе главног вретена) (Слика 3-119 -г). Приликом дефинисања геометрије изменљиве плочице, неопходно је дефинисати: полупречник заобљења врха изменљиве плочице (*Nose radius*), угао врха изменљиве плочице, дебљину изменљиве плочице (*Thickness*), леђни угао изменљиве плочице (*Clearance angle*) и дужину резне ивице изменљиве плочице (Слика 3-120 -а и -б). Такође, на нивоу целог алата, неопходно је дефинисати компензацију врха алата (*Reference compensation*), и то за све алате који не ротирају у току обраде (Слика 3-120 -в).



а)



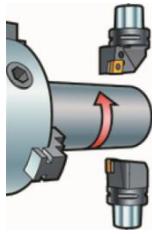
б)



в)

- Слика 3-120** Подешавање одлика геометрије негативне изменљиве плочице алата за спољашње уздужно и/или попречно стругање:
- (а) геометрије изменљиве плочице на приказу 2D профила,
  - (б) подешавање одлика геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података, в) одређивање компензације врха алата.

Према положају резне ивице алата у односу на предмет обраде, разликују се леви и десни алати (Слика 3-121 ).



а)



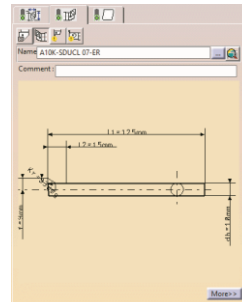
б)

**Слика 3-121** Положај резне ивице алата у односу на предмет обраде: (а) леви алат, (б) десни алат. Обратите пажњу на положај изменљиве плочице и смер обртања главног вретена.

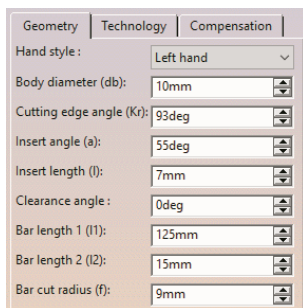
На слици (Слика 3-122 -а) приказан је геометријски модел алата за унутрашње уздужно стругање са механички причвршћеном изменљивом плочицом.



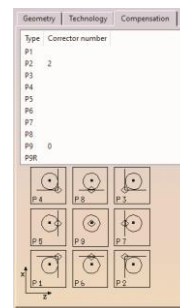
а)



б)



в)

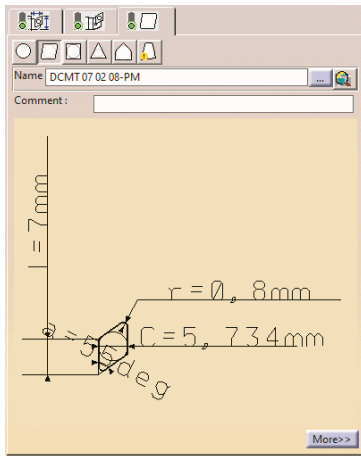


г)

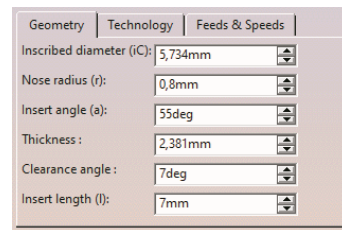
**Слика 3-122** Подешавање одлика геометрије држача алата за унутрашње уздужно стругање: (а) геометријски модел алата, (б) подешавање параметара геометрије држача у приказу профила, (в) подешавање параметара геометрије држача кроз унос или бирање података, г) одређивање компензације врха алата.

Приликом дефинисања геометрије држача, неопходно је дефинисати да ли је у питању леви или десни држач, пречник дршке држача

(*Body diameter*), главни нападни угао алата, угао врха изменљиве плочице, дужину резне ивице изменљиве плочице, грудни угао држача, дужину држача (*Bar length 1*), и две преостале дужинске и ширинске мере (дужину активног дела алата (*Bar length 2*) и функционалну ширину алата (полупречник резања алата) (*Bar cut radius*)) (Слика 3-122 -б и -в). Такође је неопходно дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-122 -г). Приликом дефинисања геометрије изменљиве плочице, неопходно је дефинисати: полупречник заобљења врха изменљиве плочице, угао врха изменљиве плочице, дебљину изменљиве плочице, леђни угао изменљиве плочице и дужину резне ивице изменљиве плочице (Слика 3-123 ).



а)

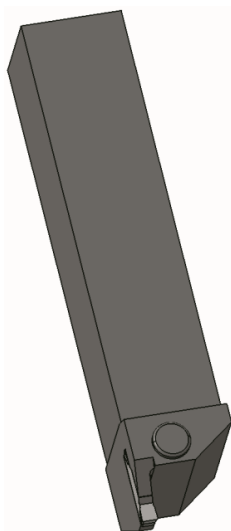


б)

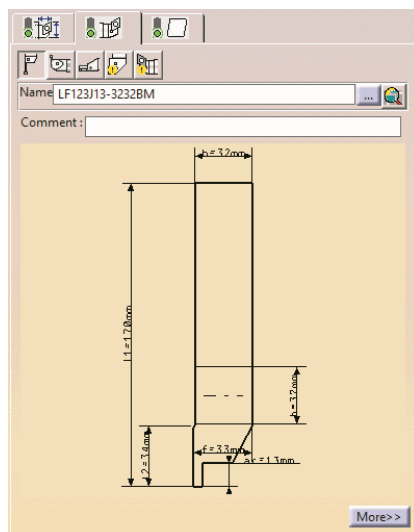
**Слика 3-123** Подешавање одлика геометрије позитивне изменљиве плочице алата за унутрашње уздужно стругање: (а) подешавање параметара геометрије изменљиве плочице у приказу профила, (б) подешавање параметара геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података.

Геометријски модел алата за усецање спољашњег жлеба са механички причвршћеном изменљивом плочицом је приказан на слици (Слика 3-124 -а). Приликом дефинисања геометрије држача, неопходно је дефинисати да ли је у питању леви или десни држач, угао између осе држача и осе изменљиве плочице (*Hand angle*), ширину изменљиве плочице (*Insert width*), грудни угао држача, висину дршке држача, ширину дршке држача, дужину држача, и две преостале дужинске и ширинске мере (дужину активног дела алата (*Shank length 2*) и функционалну ширину алата (ширину резања алата) (*Shank cut width*)) (Слика 3-124 -б и -в). Такође је неопходно дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-124 -г). Приликом дефинисања геометрије изменљиве плочице, неопходно је дефинисати чеони угао изменљиве плочице (*Bottom angle*), угао левог бока изменљиве плочице (*Left flank angle*), угао десног бока

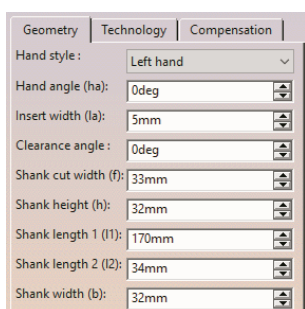
изменљиве плочице (*Right flank angle*), полупречник заобљења левог врха изменљиве плочице (*Left nose radius*), полупречник заобљења десног врха изменљиве плочице (*Right nose radius*), висину изменљиве плочице (*Height*), дебљину изменљиве плочице и ширину изменљиве плочице и леђни угао изменљиве плочице (Слика 3-125 ).



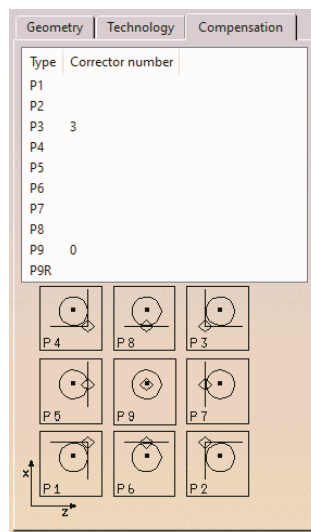
а)



б)

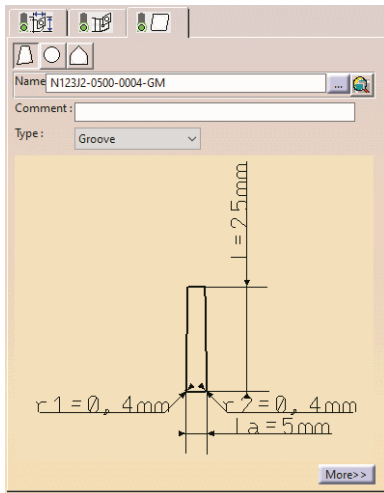


в)

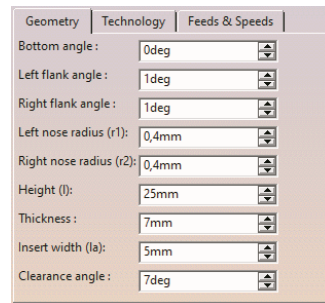


г)

**Слика 3-124** Подешавање одлика геометрије држача алата за усецање спољашњег жлеба: (а) геометријски модел алата, (б) задавање параметара геометрије држача у приказу профила, (в) подешавање параметара геометрије држача кроз унос или бирање података, (г) одређивање компензације врха алата.



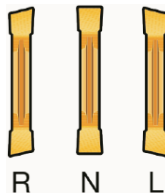
а)



б)

**Слика 3-125** Подешавање одлика геометрије изменљиве плочице алата за усецање спољашњег жлеба: (а) подешавање параметара геометрије изменљиве плочице у приказу профила, (б) подешавање параметара геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података.

Према величини чеоног угла разликују се три врсте изменљивих плочица за усецање жлеба: десна (*R*), неутрална (*N* (чеони угао је  $0^\circ$ )) и лева (*L*) (Слика 3-126 ). Први избор је неутрална изменљива плочица.



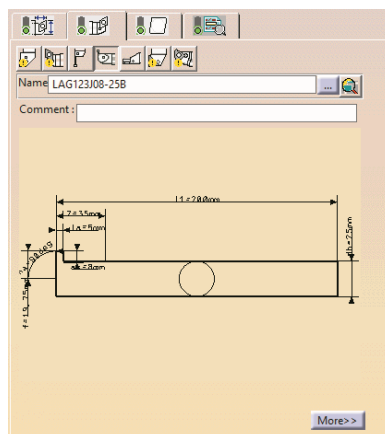
**Слика 3-126** Изменљиве плочице за усецање жлеба са различитим чеоним угловима.

Геометријски модел алата за усецање унутрашњег жлеба са механички причвршћеном изменљивом плочицом је приказан на слици: (Слика 3-127 а). Приликом дефинисања геометрије држача, неопходно је дефинисати пречник дршке држача, да ли је у питању леви или десни држач, угао између осе држача и осе изменљиве плочице, ширину изменљиве плочице, грудни угао држача, дужину држача, и две преостале дужинске и ширинске мере (дужину активног дела алата (*Bar length 2*) и функционалну ширину алата (полупречник резања алата) (*Bar cut radius*)) (Слика 3-127 -б и -в). Такође, неопходно је дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-127 -г). Геометрија изменљиве плочице се

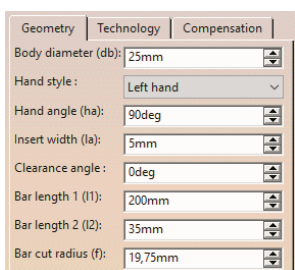
дефинише на исти начин као и код алата за усецање спољашњег жлеба (Слика 3-125 ).



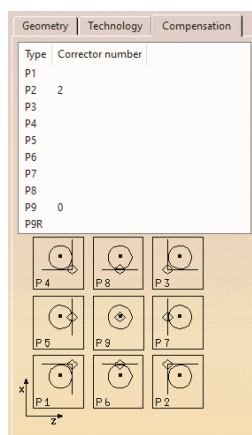
а)



б)



в)

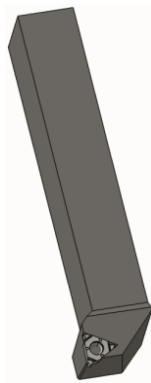


г)

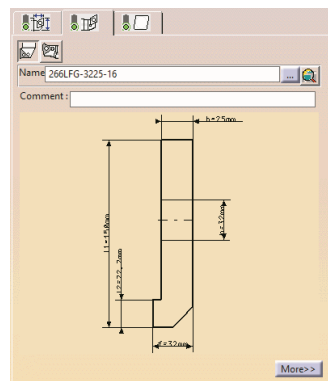
**Слика 3-127** Подешавање одлика геометрије држача алата за усецање унутрашњег жлеба: (а) геометријски модел алата, (б) подешавање параметара геометрије држача у приказу профила, (в) подешавање параметара геометрије држача кроз унос или бирање података, (г) одређивање компензације врха алата.

Геометријски модел алата за израду спољашњег навоја са механички причвршћеном изменљивом плочицом је приказан на слици: (Слика 3-128 -а). Приликом дефинисања геометрије држача, потребно је дефинисати да ли је у питању леви или десни држач, величину изменљиве плочице (*Insert length*), висину дршке држача, ширину дршке држача, дужину држача, и две преостале дужинске и ширинске мере (дужину активног дела алата (*Shank length 2*) и функционалну ширину алата (ши-

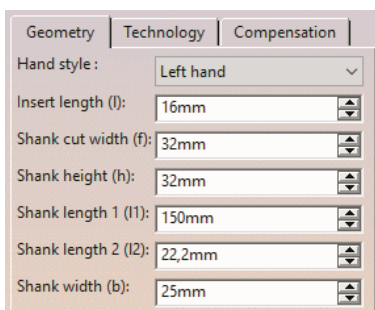
рину резања алата) (*Shank cut width*) (Слика 3-128 -б и -в). Такође, неопходно је дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-128 -г). Приликом дефинисања геометрије изменљиве плочице, потребно је дефинисати угао врха изменљиве плочице (у вези са углом профила навоја) (*Thread angle*), полупречник заобљења врха изменљиве плочице, да ли је у питању лева или десна изменљива плочица (*Hand style*), дебљину изменљиве плочице, начин дефинисања корака навоја (*Thread definition* (могуће вредности су *Pitch* (корак) и *Threads per inch* (број навојака по инчу; за империјални систем мера))), величину измењиве плочице, корак навоја (*Pitch of thread*), висину зуба изменљиве плочице (*Tooth Y*), *X* позицију краја зуба изменљиве плочице (*Tooth X*), *Z* позицију краја зуба изменљиве плочице (*Tooth Z*) и профил навоја (*Thread profile*) (Слика 3-129 ).



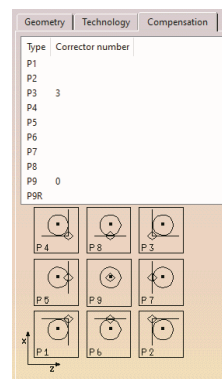
а)



б)



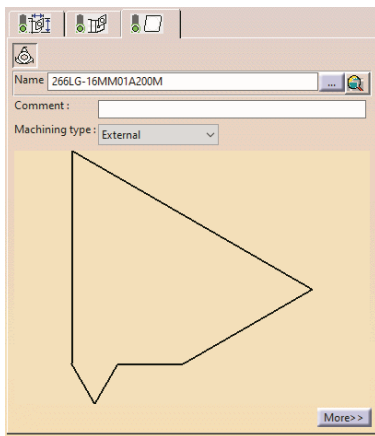
в)



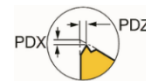
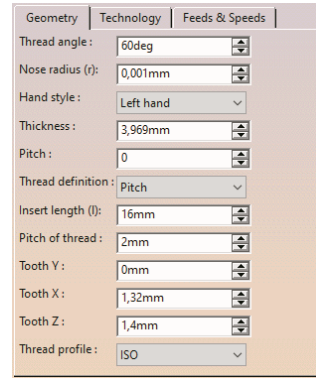
г)

**Слика 3-128** Подешавање одлика геометрије држача алата за израду спољашњег навоја: (а) геометријски модел алата, (б) подешавање параметара геометрије држача у приказу профила, (в) подешавање параметара геометрије држача кроз унос или бирање података, (г) одређивање компензације врха алата.





а)

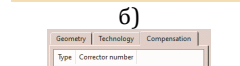


б)

**Слика 3-129** Подешавање одлика геометрије изменљиве плочице алата за израду спољашњег навоја: (а) подешавање параметара геометрије изменљиве плочице у приказу 2D профила, б) подешавање параметара геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података.

На слици (Слика 3-130 -а) приказан је геометријски модел алата за израду унутрашњег навоја са механички причвршћеном изменљивом плочицом. Приликом дефинисања геометрије држача, потребно је дефинисати пречник дршке држача, да ли је у питању леви или десни држач, величину изменљиве плочице, дужину држача, и две преостале дужинске и ширинске мере (дужину активног дела алата (*Bar length 2*) и функционалну ширину алата (полупречник резања алата) (*Bar cut radius*)) (Слика 3-130 -б и -в). Такође, потребно је дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-130 -г). Геометрија изменљиве плочице се дефинише на исти начин као и код алата за израду спољашњег навоја (Слика 3-129).

Поједностављен геометријски модел једноделне завојне бургије и сама једноделна завојна бургија су приказани на слици: (Слика 3-131 -а). Приликом дефинисања геометрије алата, потребно је дефинисати номинални пречник бургије (*Nominal diameter*), укупну дужину бургије (*Overall length*), корисну дужину бургије (*Cutting length*), дужину завојних жлебова (радног дела) бургије (*Length*), пречник дршке бургије (*Body diameter*) и угао врха бургије (*Cutting angle*) (Слика 3-131 -б и -в). Такође, неопходно је дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-131 -г).



Technology

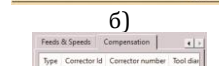
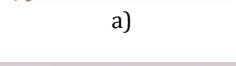
number

B)

еш

г)  
а алата за изр.

a 3:



Compen	
Id	Correc

B)

31

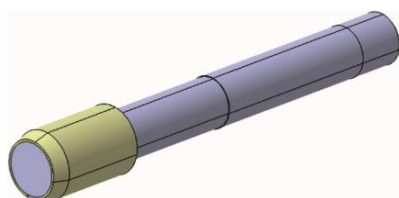
г)  
елне завојне бу

[BO]

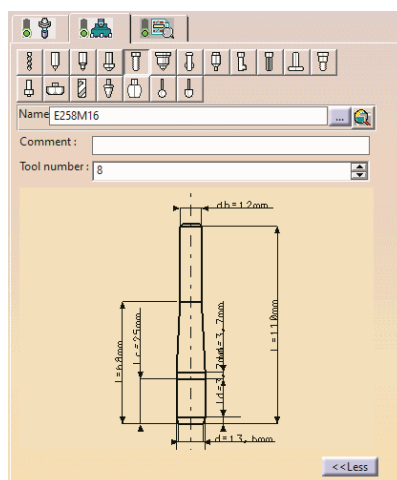
---

3-164

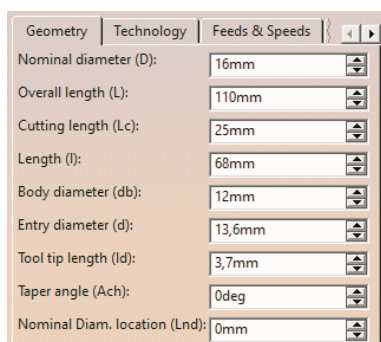
На слици (Слика 3-132) приказани су поједностављен геометријски модел урезника и сам урезник. Приликом дефинисања геометрије алата, неопходно је дефинисати номинални пречник урезника, укупну дужину урезника, корисну дужину урезника, дужину завојних жлебова (радног дела) урезника, пречник дршке урезника, пречник улазног дела урезника (*Entry diameter*) и дужину улазног дела урезника (*Tool tip length*) (Слика 3-132 -б и -в). Такође је неопходно дефинисати и компензацију врха алата (Слика 3-132 -г).



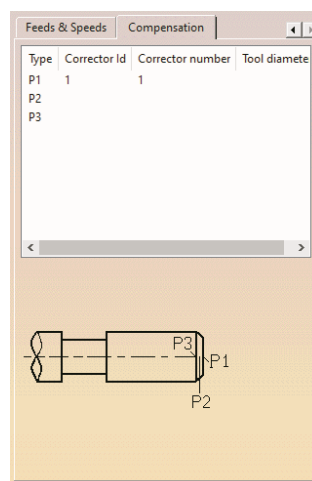
а)



б)



в)

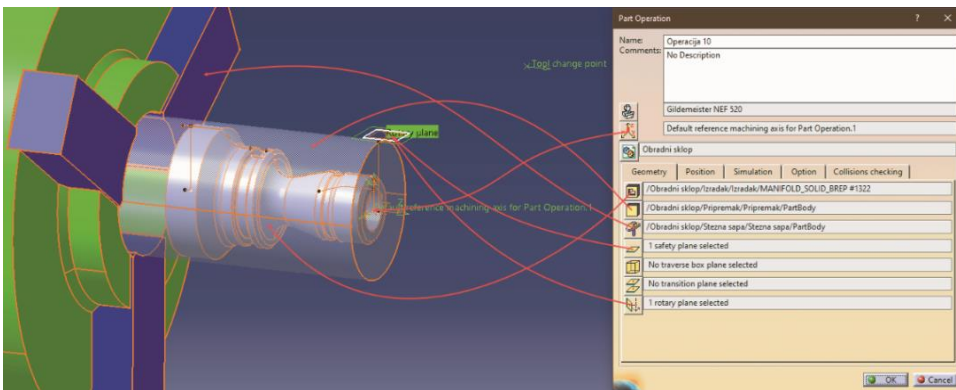


г)

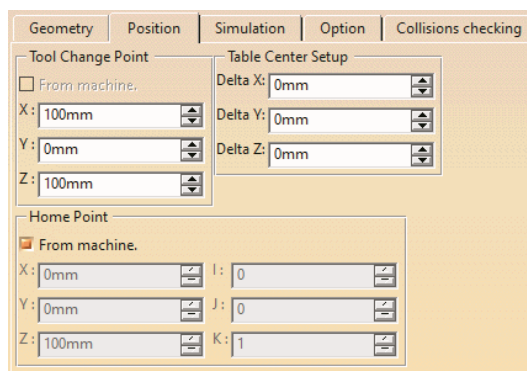
**Слика 3-132** Дефинисање геометрије урезника: (а) поједностављен геометријски модел алата, (б) подешавање параметара геометрије урезника у графичкој области, (в) подешавање параметара геометрије урезника кроз унос или бирање података, (г) избор компензације врха алата.

### 3.2.3.2 Моделирање операције обраде стругањем

Приликом креирања операције обраде стругањем, потребно је дефинисати назив операције и координатни систем обратка, изабрати делове који ће представљати израдак (*Design part*), припремак (*Stock*) и стезну шапу (*Fixture*) (као најистуренији део стезне главе) и изабрати раван којом ће бити дефинисани безбедна раван и безбедни цилиндар (*Rotary plane*) (Слика 3-133). Такође, потребно је дефинисати координате тачке за измену алата (*Tool change point*) у координатном систему обратка (Слика 3-134). У стаблу модела, у оквиру гране која се односи на операцију, бива креиран и производни програм (или технолошки план) (*Manufacturnig program*).



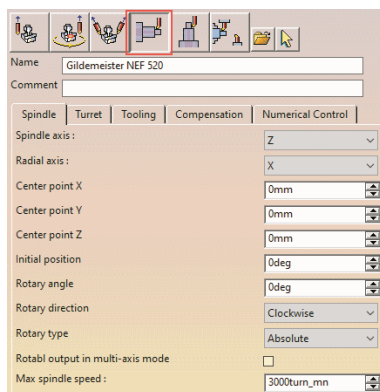
Слика 3-133 Креирање операције обраде стругањем.



Слика 3-134 Дефинисање координата тачке за измену алата.

Креирање операције обраде стругањем такође подразумева и дефинисање параметара нумерички управљаног струга. У овом случају потребно је изабрати врсту машине алатке, дефинисати назив произвођача и модел машине, изабрати осу главног вретена (*Spindle axis*) и радијалну осу (*Radial axis*), које заједно чине радну раван (*Working plane*)

приликом програмирања, изабрати смер ротације главног вретена (*Rotary direction*) приликом израде кружног низа рупа или отвора на чеоној површини и дефинисати максималан број обртаја главног вретена (*Max spindle speed*) (Слика 3-135).



Слика 3-135 Дефинисање параметара хоризонталног нумерички управљаног струга.

### 3.2.3.3 Моделирање захвата стругања

#### 3.2.3.3.1 Врсте захвата обраде (2-, 3-, 4-, 5-осна обрада)

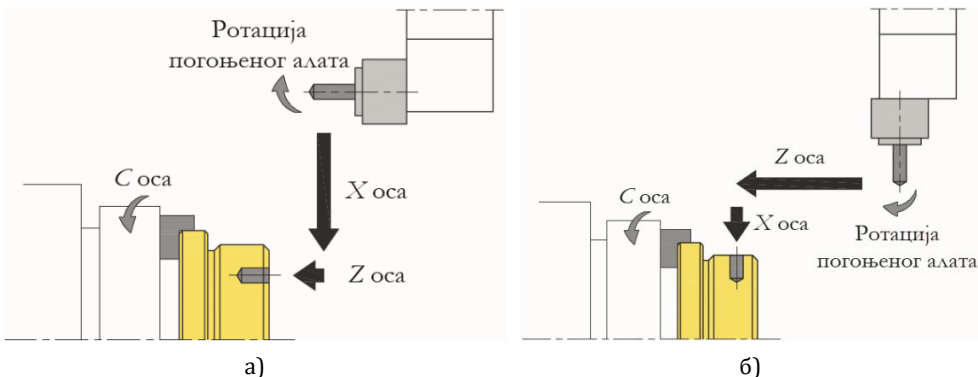
Нумерички управљани стругови се могу категоризовати према конструкцији и према броју оса. Када се говори о конструкцији, односно о оријентацији главног вретена, могу се разликовати вертикални и хоризонтални нумерички управљани стругови. Хоризонтални нумерички управљани стругови су далеко више заступљени у производним погонима. Вертикални нумерички управљани стругови су намењени обради делова великих димензија и маса.

Нумерички управљани стругови се најчешће разликују према броју програмабилних оса. Типичан нумерички управљани струг има две стандардне програмабилне осе,  $X$  осу и  $Z$  осу. Ове осе су међусобно нормалне.  $X$  оса обезбеђује попречно кретање алата, док  $Z$  оса обезбеђује уздужно кретање алата. У двоосне захвате код стругања спадају спољашње уздужно/попречно стругање по сложеној контури, унутрашње уздужно/попречно стругање по сложеној контури, усецање спољашњег/унутрашњег жлеба, израда спољашњег/унутрашњег навоја, центрично бушење и центрично урезивање навоја. Вертикални нумерички управљани стругови стандардно имају две програмабилне осе (Слика 3-136 -а). Хоризонтални нумерички управљани стругови, који се уобичајено пројектују са две програмабилне осе (Слика 3-136 -б), такође су доступни и са три, четири, шест и осам програмабилних оса.

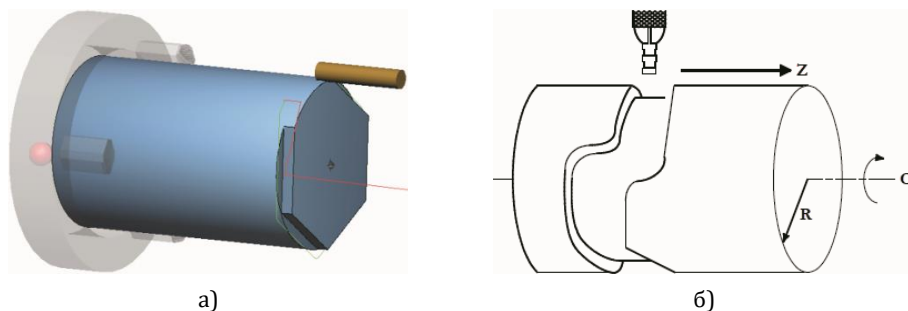


**Слика 3-136** Типична конфигурација вертикалног нумерички управљаног струга (а). Типична конфигурација двоосног нумерички управљаног струга (б).

Троосни нумерички управљани струг је у суштини двоосни нумерички управљани струг са додатном осом. Та оса је најчешће  $C$  оса (ротација око  $Z$  осе) и потпуно је програмабилна. Трећа оса се користи за захвате глодања или бушења на чеоној или периферној површини обратка, који се врше помоћу погоњених алата (*Live tool*). Ротација главног вретена са обратком ( $C$  оса) је директно повезана са кретањима погоњеног алата по  $X$  и/или  $Z$  оси. На овај начин се израђују жлебови, низови рупа на чеоној (Слика 3-137 -а) или периферној (Слика 3-137 -б) површини обратка, шестоугаоне форме (Слика 3-138 -а) и цилиндрични жлебови (Слика 3-138 -б).

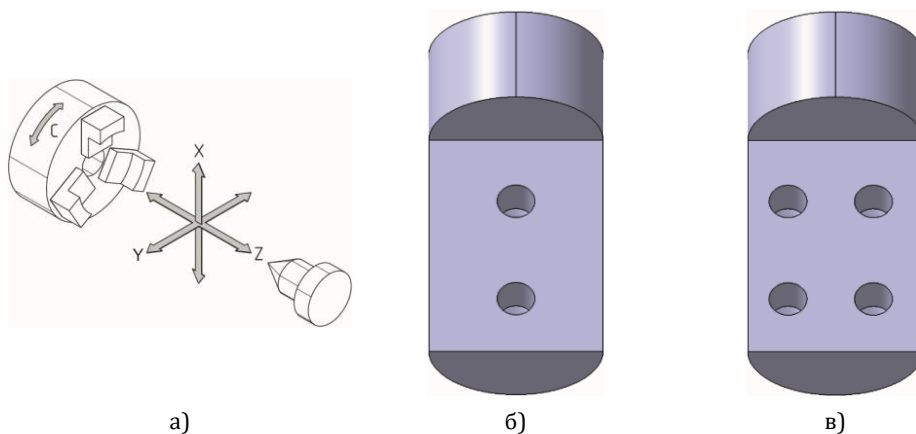


**Слика 3-137** Коришћење  $X$  и  $Z$  осе у комбинацији са  $C$  осом: (а)  $C$  оса и хоризонтална оријентација погоњеног алата, за обраду на чеоној површини обратка, (б)  $C$  оса и вертикална оријентација погоњеног алата, за обраду на периферној површини обратка.



**Слика 3-138** Израда шестоугаоне форме помоћу погоњеног алата у софтверу *SinuTrain for SINUMERIK Operate* (а). Израда цилиндричног жлеба<sup>22</sup> (б).

Захвати бушења и глодања који користе само  $C$  осу могу се вршити само у  $XZ$  радној равни. Код једне од варијанти четвороосних нумерички управљаних стругова  $C$  оса се комбинује са  $Y$  осом, чиме се у великој мери повећава флексибилност обраде.  $Y$  оса је нормална на  $X$  и  $Z$  осу (Слика 3-139 -а) и оријентација координатног система је слична оријентацији код вертикалног обрадног центра.  $Y$  оса не може постојати без  $C$  осе. Низ рупа на делу приказаном на Слика 3-139 -б) може се израдити на нумерички управљаном стругу који има само  $C$  осу, док се низ рупа на делу приказаном на Слика 3-139 -в) може израдити на нумерички управљаном стругу са  $Y$  осом.

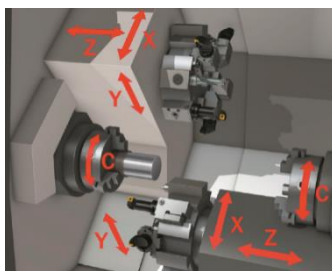


**Слика 3-139** Оријентација оса на стругу са  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $C$  осом (а). Низ рупа на делу се може израдити на нумерички управљаном стругу који има додатну контролу  $C$  осе (б). Низ рупа на делу се може израдити на нумерички управљаном стругу који мора имати додатну контролу  $Y$  осе (в).

<sup>22</sup> Слика је преузета са интернет странице чија је адреса <https://www.cnccode.com/4213/cnc-g07-1-code-cylindrical-interpolation-quick-guide>



Увођењем још једног носача алата (*Turret*) (најчешће је у питању револверска глава) и евентуално секундарног вретена (*Subspindle*), број програмабилних оса нумерички управљаног струга може се повећати до осам. У том случају говоримо о стругарском центру (*Turning center*) (Слика 3-140 ). Када нумерички управљани струг има само једно вретено и два носача алата, један носач алата се најчешће користи за спољашњу, а други за унутрашњу обраду. У том случају се у одређеној мери може симултано реализовати спољашња и унутрашња обрада. Ограничење је коришћење једног вретена, при чему се број обртаја вретена у датом тренутку односи и на спољашњу и на унутрашњу обраду. Ово ограничење је решено увођењем секундарног вретена. У том случају се примарно вретено и један носач алата користе за спољашњу и/или унутрашњу обраду са једне стране обратка, док се секундарно вретено и други носач алата користе за спољашњу и/или унутрашњу обраду са друге стране обратка, и све обраде се врше симултано (Слика 3-140 ).



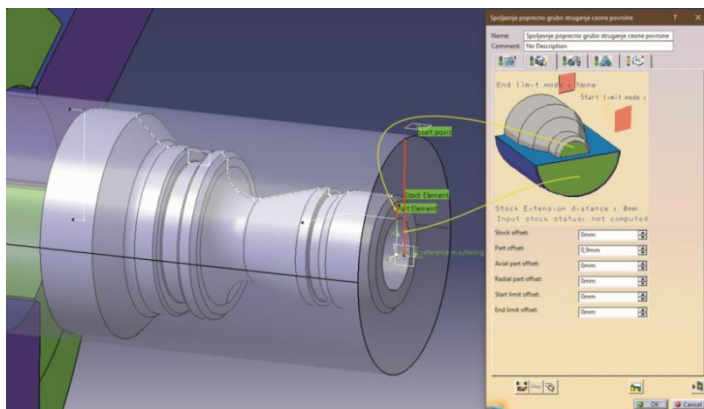
Слика 3-140 Стругарски центар са два вретена, два носача алата и осам програмабилних оса.

### 3.2.3.3.2 Главна кретања (путање) алата/обратка

Као што је раније речено, на нивоу сваког захвата неопходно је дефинисати обрадну геометрију, којом се означава област у којој ће се вршити уклањање материјала. Главно кретање, на нивоу сваког пролаза, обухвата празан ход пре уласка алата у захват са обратком, кретање ради уклањања материјала и празан ход при изласку алата из захвата са обратком. Начин на који ће се алат кретати приликом уклањања материјала, односно изглед путања алата, дефинише се преко параметара који се односе на стратегију обраде.

У даљем тексту ће бити описана процедура дефинисања обрадне геометрије, параметара који се односе на стратегију обраде, празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за карактеристичне двоосне захвате код стругања. За сваки од захвата ће такође бити приказана и симулација путање центра врха алата.

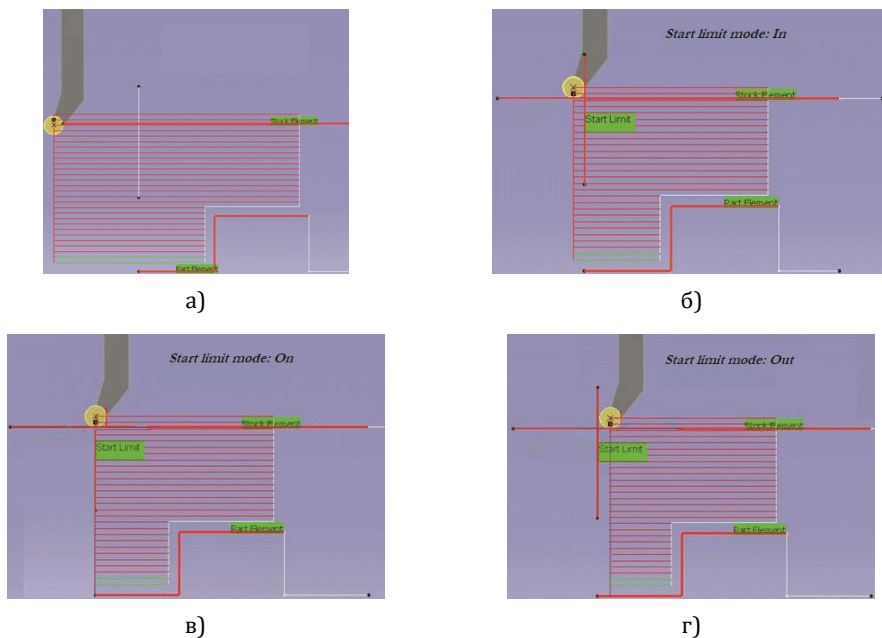
Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине (*Rough Turning*)** се може видети на слици (Слика 3-141). Том приликом је неопходно изабрати обрадну контуру на припремку (профил припремка) (*Stock element*), која је била креирана на нивоу геометријског модела припремка, и обрадну контуру на изратку (профил изратка) (*Part element*), која је део једне од обрадних контура које су креиране на нивоу геометријског модела изратка. Овим је дефинисана област у којој ће се вршити уклањање материјала. Дефинисањем вредности за параметар *Stock offset*, може се извршити померање профила припремка или обратка. Додатак за фину обраду се може дефинисати уносом вредности за параметре *Part offset* (померање профила изратка), *Axial part offset* (померање профила изратка у аксијалном правцу) или *Radial part offset* (померање профила изратка у радијалном правцу). Померања профила могу бити позитивна или негативна, узимајући у обзир оријентацију позитивних делова оса координатног система обратка. У конкретном случају унета је вредност за параметар *Part offset*.



**Слика 3-141** Одређивање обрадне геометрије за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине.

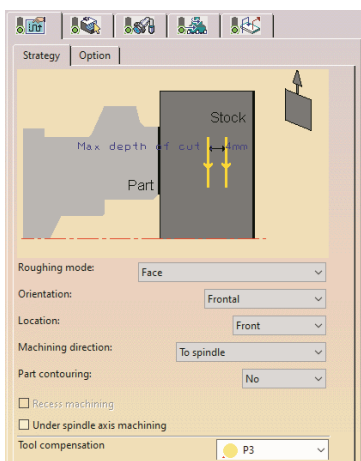
Помоћу опције *Start limit* (Слика 3-141 ) може се изабрати тачка, линија, крива или страна као почетни елемент профила припремка или обратка. Ако се изабере страна, почетни елемент ће бити пресек изабране стране и радне равни (*XZ* раван). Овом опцијом се додатно ограничава само профил припремка или обратка и иста, у општем случају, не утиче на профил изратка. Позиција почетног елемента профила припремка или обратка је додатно дефинисана параметром *Start limit mode*, који може имати једну од следећих вредности: *None*, *In*, *On* и *Out*. Ако се изабере вредност *None*, која је подразумевана, или ако се не дефинише почетни елемент профила припремка или обратка, профил изратка се проду-

жава до краја профила припремка или обратка (Слика 3-142 -а). Избором вредности *In*, *On* и *Out* дужина профила припремка или обратка се може ограничити или изменити у складу са изабраним почетним елементом профила (Слика 3-142 -б, -в и -г). Помоћу опције *End limit* (Слика 3-141 ) може се изабрати тачка, линија, крива или страна као крајњи елемент профила изратка, како би се исти додатно ограничио или екстраполирао. Овим се, такође, додатно ограничава профил припремка или обратка. И у овом случају је доступан параметар *End limit mode*, са могућим вредностима *None*, *In*, *On* и *Out*, који има ефекат еквивалентан ефекту параметра *Start limit mode*. Уносом вредности за параметре *Start limit offset* и *End limit offset* (Слика 3-141 ), може се извршити померање почетног елемента профила припремка или обратка и крајњег елемента изратка, респективно, и то само у случају да је елемент линија или крива и да је за параметар *Start limit mode* / *End limit mode* изабрана вредност *In* или *Out*. Дефинисањем вредности параметра *Stock extension distance* (Слика 3-141 ), профил припремка или обратка се може продужити за дефинисано растојање у смеру обраде. Овај параметар се узима у обзир само ако је за параметар *End limit mode* изабрана вредност различита од *None*.

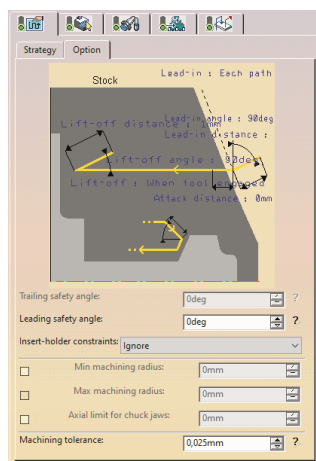


**Слика 3-142** Ограничавање профила припремка или обратка помоћу линије:  
 (а) почетни елемент профила припремка или обратка није дефинисан или је за параметар *Start limit mode* изабрана вредност *None*, (б) за параметар *Start limit mode* је изабрана вредност *In*, (в) за параметар *Start limit mode* је изабрана вредност *On*, (г) за параметар *Start limit mode* је изабрана вредност *Out*.

Процедура дефинисања параметара „стратегије” обраде за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине се може видети на слици (Слика 3-143 -а). У овом случају је потребно дефинисати вредност за максималну дубину резања по пролазу (*Max depth of cut*), изабрати начин кретања алата у току грубе обраде (*Roughing mode* (могуће вредности су *Longitudinal* (уздужно, у правцу осе обратка), *Face* (попречно, нормално на правац осе обратка) и *Parallel contour* (путање алата по пролазима ће бити међусобно паралелне, налик изабраној обрадној контури на изратку))), локацију области у којој ће се вршити уклањање материјала (*Orientation* (могуће вредности су *Internal* (унутрашња обрада и обрада чеоне површине), *External* (спољашња обрада и обрада чеоне површине) и *Frontal* (обрада чеоне површине))), страну обратка на којој ће се вршити уклањање материјала (*Location* (могуће вредности су *Front* и *Back*)), смер кретања алата приликом уклањања материјала (*Machining direction* (могуће вредности су *To spindle* (према осе обратка) и *From spindle* (од осе обратка)), да ли се врши „чишћење” обрадне контуре на изратку (кретање алата по контури) (*Part contouring* (могуће вредности су *No* (не врши се „чишћење” обрадне контуре), *Each path* (врши се „чишћење” обрадне контуре у сваком пролазу грубе обраде) и *Last path only* (врши се „чишћење” обрадне контуре у последњем пролазу грубе обраде)) и компензацију врха алата (*Tool compensation*). Избором опције *Under spindle axis machining* омогућава се уклањање материјала испод осе обратка.



а)

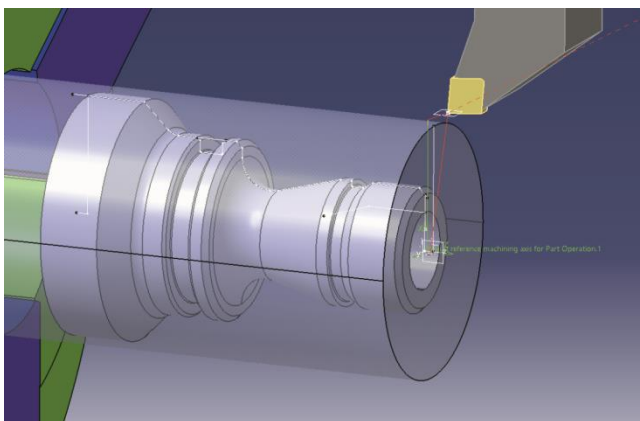


б)

**Слика 3-143** Одређивање параметара стратегије обраде за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине (а). Одређивање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине (б).

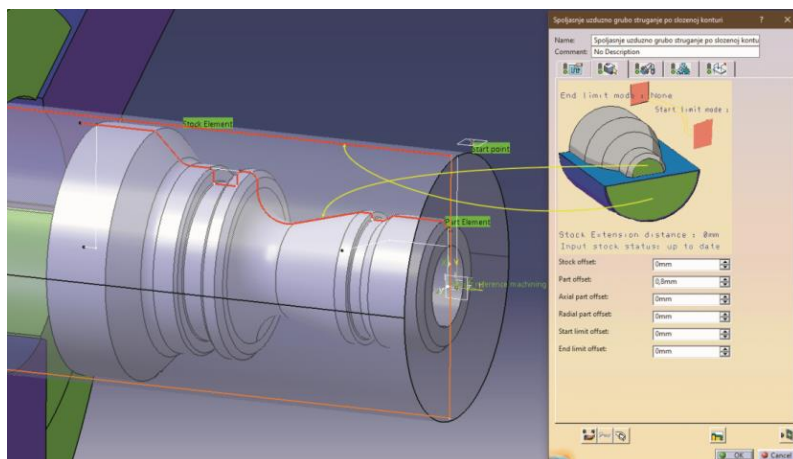
На крају, за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине потребно је дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-143 -б). Параметар *Lead-in* се односи на празан ход пре уласка алата у захват са обратком. Могуће вредности овог параметра су: *No* (нема празног хода), *Each path* (празан ход постоји за сваки пролаз) и *Last path only* (празан ход постоји само за последњи пролаз). Празан ход пре уласка алата у захват са обратком се дефинише помоћу параметара *Lead-in distance* (растојање празног хода) и *Lead-in angle* (угао правца празног хода). Растојање празног хода узима у обзир безбедно растојање (*Stock clearance*), односно рачуна се до безбедног растојања. До почетка празног хода пре уласка алата у захват са обратком алат се креће брзим ходом померања. Угао правца празног хода пре уласка алата у захват са обратком се мери у односу на нормалу на правац резања. Параметар *Attack distance* омогућава дефинисање растојања приликом продирања алата у материјал на коме ће се алат кретати смањеним кораком, како би се спречило оштећење алата. Овај параметар такође узима у обзир безбедно растојање, односно рачуна се од безбедног растојања. Параметар *Lift-off* се односи на празан ход при изласку алата из захвата са обратком. Могуће вредности овог параметра су: *No* (нема празног хода), *When tool engaged* (празан ход постоји када је алат у захвату) и *Each path* (празан ход постоји за сваки пролаз). Празан ход при изласку алата из захвата са обратком се дефинише помоћу параметара *Lift-off distance* (растојање празног хода) и *Lift-off angle* (угао правца празног хода). Угао правца празног хода при изласку алата из захвата са обратком се мери у односу на правац резања. Вредност параметра *Machining tolerance* је максимално дозвољено растојање између теоријске и израчунате путање алата.

На слици (Слика 3-144 ) се може видети симулација путање центра врха алата за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине. Линије жуте боје се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком (*Lead-in*) и продирање у материјал (*Approach*). Линије зелене боје се односе на кретање алата приликом уклањања материјала (*Machining*). Линије плаве боје се односе на празан ход при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off*) и повлачење алата код бушачких захвата (*Reatract*). Линије црвене боје се односе на кретање брзим ходом померања (*Rapid traverse*).



**Слика 3-144** Симулација путање центра врха алата за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине.

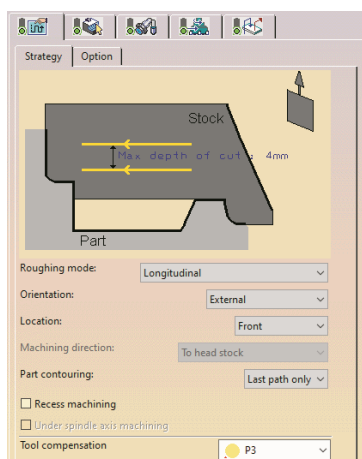
Процедура дефинисања обрадне геометрије за захват **спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (Rough Turning)** је приказана на слици (Слика 3-145 ). На почетку креирања овог и следећих захвата неопходно је ажурирати контуру обратка (*Update input stock*). На овај начин се генерише обрадна контура на обратку. Поред дела обрадне контуре на обратку, потребно је изабрати једну од обрадних контура на изратку. Дефинисан је и додатак за фину обраду, уносом вредности за параметар *Part offset*.



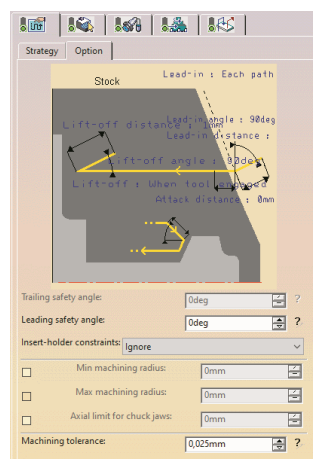
**Слика 3-145** Дефинисање обрадне геометрије за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.

Поступак дефинисања параметара стратегије обраде за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури је приказан на слици (Слика 3-146 -а). У овом случају је потребно дефинисати вредност за максималну дубину резања по пролазу, изабрати начин кретања

алата у току грубе обраде (*Roughing mode*), локацију области у којој ће се вршити уклањање материјала (*Orientation*), страну обратка на којој ће се вршити уклањање материјала (*Location*), да ли се врши „чишћење“ обрадне контуре на изратку (кретање алата по контури) (*Part contouring*) и компензацију врха алата (*Tool compensation*). Опција *Recess machining* није изабрана, што значи да се уклањање материјала неће вршити у областима спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја, конуса који прелази у заобљење и спољашњег жлеба. За захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури користи се алат са главним нападним углом од  $95^\circ$ , изменљивом плочицом чији је угао врха  $80^\circ$  и помоћним нападним углом од  $5^\circ$ , који са једне стране није намењен за усецање спољашњег жлеба, а са друге стране, због геометрије, не може у потпуности да изврши уклањање материјала у областима спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и конуса који прелази у заобљење.



а)



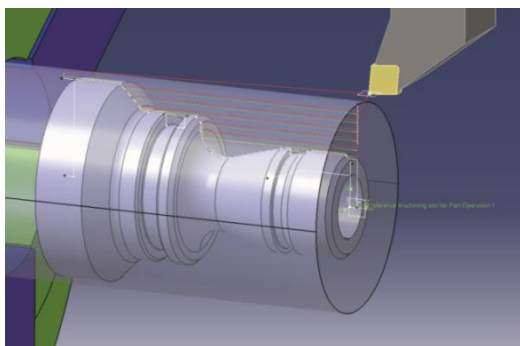
б)

**Слика 3-146** Одређивање параметара стратегије обраде за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (а).  
Одређивање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (б).

На крају је за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-146 -б).

На слици (Слика 3-147) се може видети симулација путање центра врха алата за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.

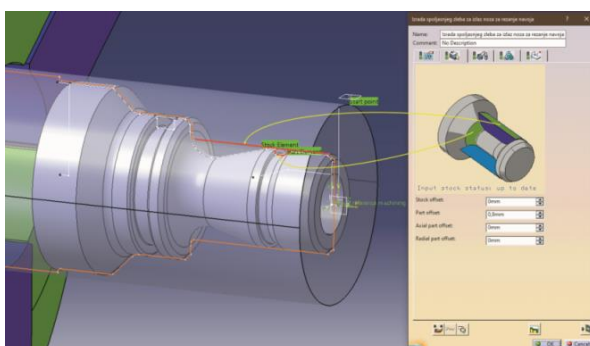




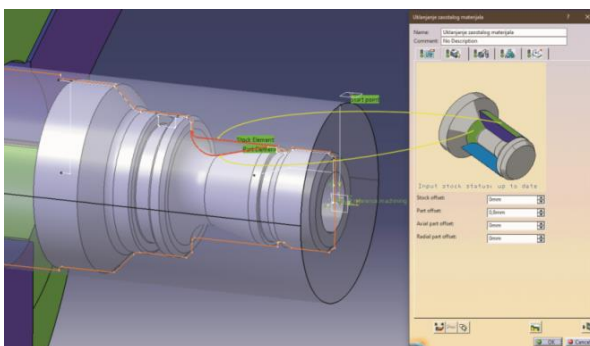
Слика 3-147 Симулација путање центра врха алата за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.

Поступак дефинисања обрадне геометрије за захвате **израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала (Recess Turning)** је приказан на слици (Слика 3-148). Код оба поменута захвата врши се уклањање заосталог материјала алатом који има главни нападни угао од  $93^\circ$ , изменљиву плочицу чији је угао врха  $35^\circ$  и помоћни нападни угао од  $52^\circ$ . Дефинисан је и додатак за фину обраду уносом вредности за параметар *Part offset*.

а)

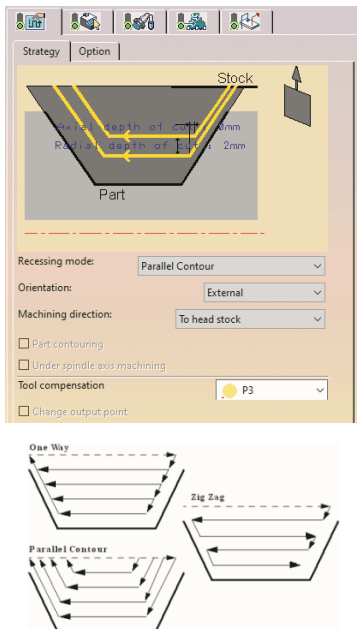


б)

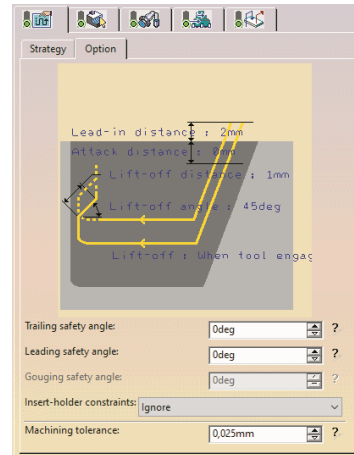


Слика 3-148 Дефинисање обрадне геометрије за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја (а) и уклањања заосталог материјала (б).

Процедура дефинисања параметара стратегије обраде за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала се може видети на слици (Слика 3-149 -а).



а)



б)

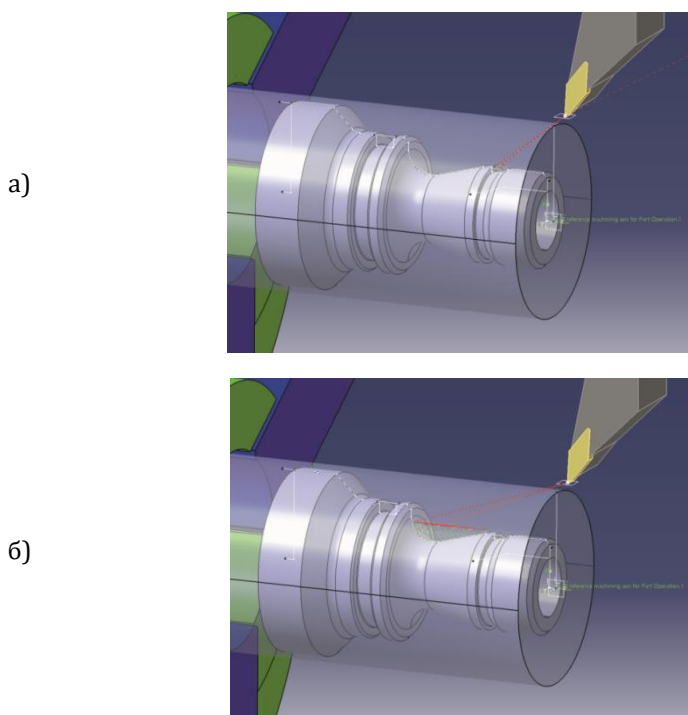
**Слика 3-149** Одређивање параметара стратегије обраде за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала (горе) и начин креирања удубљења (*Recessing mode*) (доле) (а). Одређивање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала (б).

Неопходно је дефинисати вредности за аксијалну дубину резања (*Axial depth of cut*) и радијалну дубину резања (*Radial depth of cut*), изабрати начин кретања алата приликом укопавања (*Recessing mode* (могуће вредности су *One-way* (хоризонтално кретање алата у једном смеру по пролазима), *Zig-Zag* (хоризонтално кретање алата у два смера по пролазима) и *Parallel contour* (путање алата по пролазима ће бити међусобно паралелне, налик изабраној обрадној контури на изратку))), локацију области у којој ће се вршити уклањање материјала (*Orientation* (могуће вредности су *Internal* (унутрашња обрада и обрада чеоне површине), *External* (спољашња обрада и обрада чеоне површине), *Frontal* (обрада чеоне површине) и *Other* (обрада површине под углом))), смер кретања алата приликом уклањања материјала (*Machining direction* (могуће вре-

дности су *To head stock* (према главном вретену) и *From head stock* (од главног вретена))) и компензацију врха алата (*Tool compensation*).

На крају је за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-149 -б). Угао правца празног хода при изласку алата из захвата са обратком се мери у односу на правац резања.

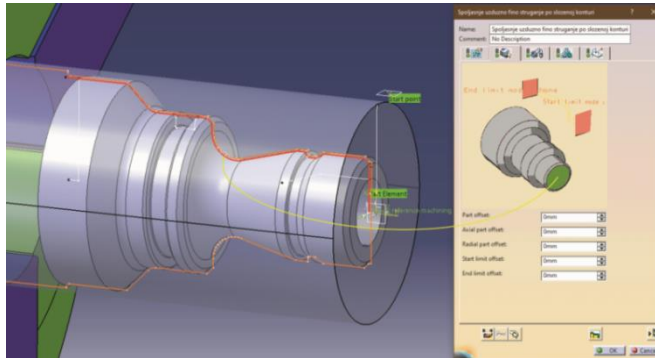
На слици (Слика 3-150) се може видети симулација путање центра врха алата за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала.



**Слика 3-150** Симулација путање центра врха алата за захвате:  
(а) Израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја,  
(б) Уклањања заосталог материјала.

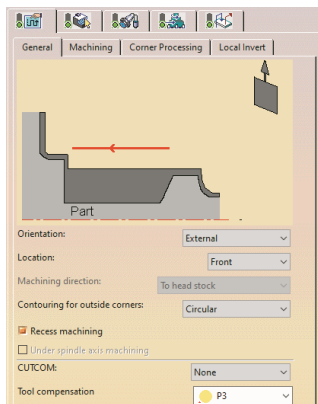
Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (*Profile Finish Turning*)** је приказан на слици (Слика 3-151 ). У овом случају неопходно је изабрати само обрадну контуру на изратку. Не бира се обрадна контура на обратку. Треба обратити пажњу на то да је изабрана и вертикална линија на почетку обрадне контуре на изратку, што значи да ће се у оквиру захвата извршити и спољашње попречно фино стругање чеоне

површине. Вредност параметра *Part offset* је сада 0mm, што значи да ће материјал бити уклоњен до изабране обрадне контуре на изратку.

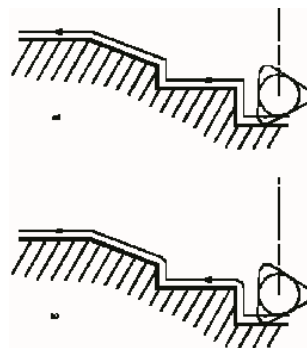


**Слика 3-151** Дефинисање обрадне геометрије за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.

Дефинисање параметара стратегије обраде за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури је приказано на слици (Слика 3-152 -а). У овом случају је потребно дефинисати локацију области у којој ће се вршити уклањање материјала (*Orientation*), страну обратка на којој ће се вршити уклањање материјала (*Location*), изабрати начин кретања алата приликом обраде спољашњих углова (*Contouring for outside corners* (могуће вредности су *Circular* (по кружном луку) и *Angular* (под углом))) (Слика 3-152 -б) и компензацију врха алата (*Tool compensation*). Обратите пажњу на то да је опција *Recess machining* изабрана.



а)

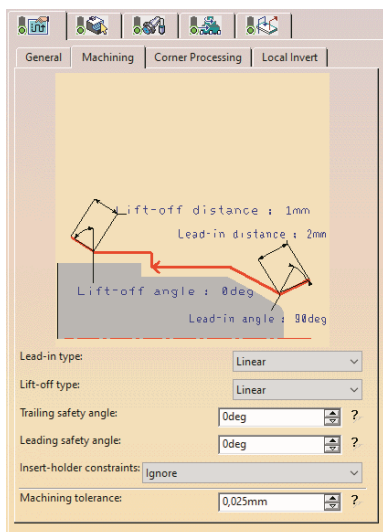


б)

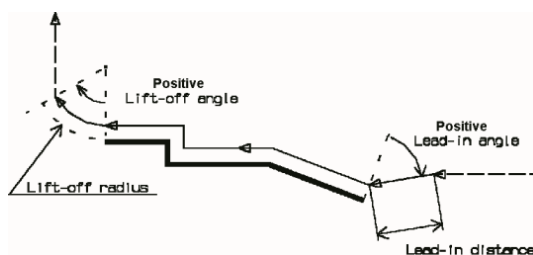
**Слика 3-152** Дефинисање параметара стратегије обраде за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (а).

Начин кретања алата приликом обраде спољашњих углова (горе: под углом; доле: по кружном луку) (б).

На крају је за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-153 -а). Овде је потребно изабрати начин кретања алата у празном ходу пре уласка алата у захват са обратком (*Lead-in type*) и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off type*). Могуће вредности параметра за оба случаја су *Linear* (по правој линији, узимајући у обзир растојање празног хода (*Lead-in distance* / *Lift-off distance*) и угао правца празног хода (*Lead-in angle* / *Lift-off angle*)) и *Circular* (по кружном луку који је тангентан на профил издатка у тачки на почетку/крају профила, узимајући у обзир полупречник кружног лука (*Lead-in radius* / *Lift-off radius*) и угао кружног лука (*Lead-in angle* / *Lift-off angle*)) (Слика 3-153 -б). Угао правца празног хода и угао кружног лука мере се у односу на нормалу на правац резања.



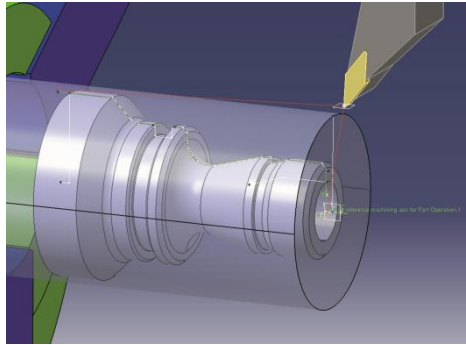
а)



б)

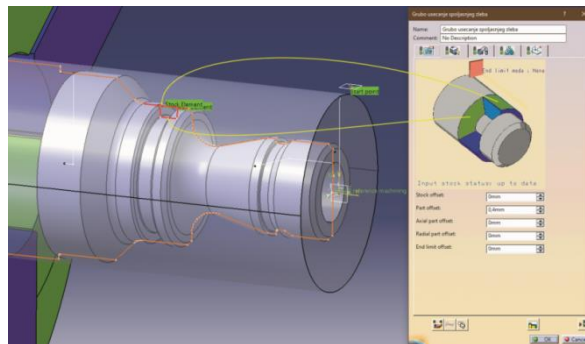
**Слика 3-153** Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (а). Празан ход по правој линији пре уласка алата у захват и празан ход по кружном луку при изласку алата из захвата (б).

На слици (Слика 3-154) се може видети симулација путање центра врха алата за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.



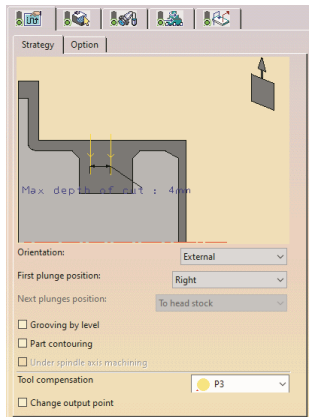
**Слика 3-154** Симулација путање центра врха алата за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.

Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **грубог усецања спољашњег жлеба (Groove Turning)** је приказан на слици (Слика 3-155). Неопходно је изабрати обрадну контуру на обратку и обрадну контуру на изратку. Додатак за фино усецање спољашњег жлеба је дефинисан уношењем вредности 0,4 mm за параметар *Part offset*.

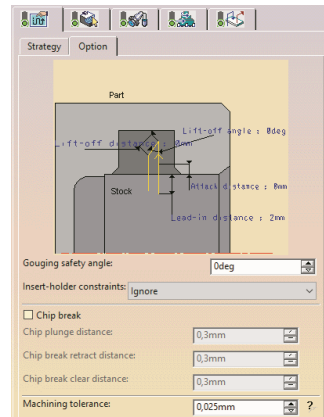


**Слика 3-155** Дефинисање обрадне геометрије за захват грубог усецања спољашњег жлеба.

Процедура дефинисања параметара стратегије обраде за захват грубог усецања спољашњег жлеба се може видети на слици (Слика 3-156 -а). Овде је неопходно дефинисати максимално растојање између уза-стопних усецања (*Max depth of cut*) и изабрати локацију области у којој ће се вршити уклањање материјала (*Orientation*), позицију првог продирања алата у материјал (*First plunge position* (могуће вредности су *Right* (десна страна жлеба), *Center* (средина жлеба) и *Left* (лева страна жлеба))) и компензацију врха алата (*Tool compensation*). Уколико се изабере опција *Grooving by level*, вршиће се усецање жлеба по нивоима у радијалном правцу, што је корисно код израде жлебова већих дубина. Уколико се изабере опција *Part contouring*, алат ће на крају захвата „проћи” по контури жлеба.



а)

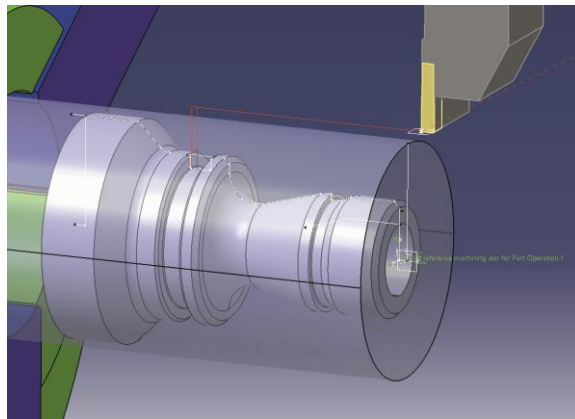


б)

**Слика 3-156** Одређивање параметара стратегије обраде за захват грубог усецања спољашњег жлеба (а). Одређивање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват грубог усецања спољашњег жлеба (б).

На крају је за захват грубог усецања спољашњег жлеба потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-156 -б). Угао правца празног хода при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off angle*) се мери у односу на правац резања. Избором опције *Chip break* активирају се додатна кретања алата ради ломљења струготине.

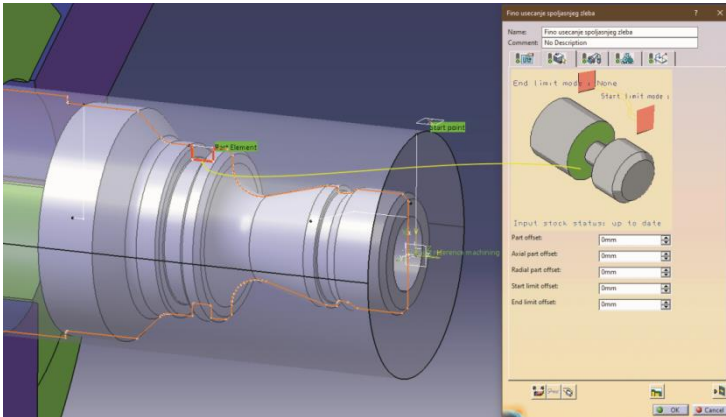
На слици (Слика 3-157) се може видети симулација путање центра врха алата за захват грубог усецања спољашњег жлеба.



**Слика 3-157** Симулација путање центра врха алата за захват грубог усецања спољашњег жлеба.

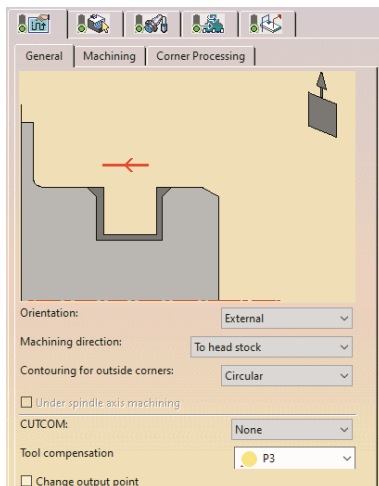


Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **финог усецања спољашњег жлеба (Groove Finish Turning)** се може видети на слици (Слика 3-158). Неопходно је изабрати само обрадну контуру на изратку. Не бира се обрадна контура на обратку.



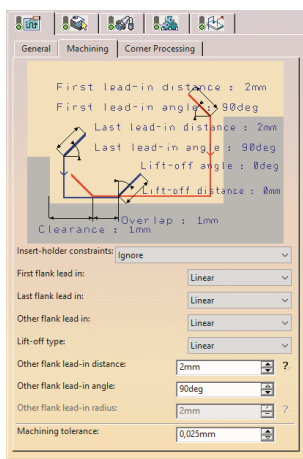
Слика 3-158 Дефинисање обрадне геометрије за захват финог усецања спољашњег жлеба.

Процедура дефинисања параметара стратегије обраде за захват финог усецања спољашњег жлеба је приказана на слици (Слика 3-159). У овом случају је потребно дефинисати локацију области у којој ће се вршити уклањање материјала (*Orientation*), смер кретања алата приликом уклањања материјала (*Machining direction*), изабрати начин кретања алата приликом обраде спољашњих углова (*Contouring for outside corners*) и компензацију врха алата (*Tool compensation*).

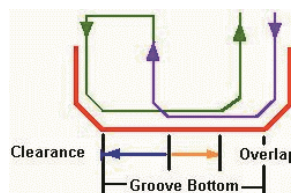
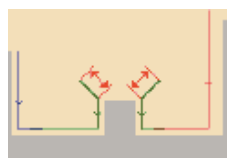


Слика 3-159 Дефинисање параметара стратегије обраде за захват финог усецања спољашњег жлеба.

На крају је за захват финог усецања спољашњег жлеба потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-160 -а). Овде је потребно изабрати начин кретања алата у празном ходу пре уласка алата у захват са обратком на првом боку (*First flank lead in*), последњем боку (*Last flank lead in*) и осталим боковима (*Other flank lead in*) (Слика 3-160 -б) и празаном ходу при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off type*). Могуће вредности параметра за све случајеве су *Linear* (по правој линији, узимајући у обзир растојање празног хода (*First lead-in distance* / *Last lead-in distance* / *Other flank lead-in distance* / *Lift-off distance*) и угао правца празног хода (*First lead-in angle* / *Last lead-in angle* / *Other flank lead-in angle* / *Lift-off angle*)) и *Circular* (по кружном луку који је тангентан на профил издатка у тачки на почетку/крају профила, узимајући у обзир полупречник кружног лука (*First lead-in radius* / *Last lead-in radius* / *Other flank lead-in radius* / *Lift-off radius*) и угао кружног лука (*First lead-in angle* / *Last lead-in angle* / *Other flank lead-in angle* / *Lift-off angle*)). Углови *First lead-in angle*, *Last lead-in angle* и *Lift-off angle* се мере у односу на нормалу на правац резања. Угао *Other flank lead-in angle* се мери у односу на правац резања. Дно жлеба са стране последњег или следећег бока, након обраде са стране првог или претходног бока, ће бити обрађено до позиције дефинисане вредношћу параметра *Clearance* (Слика 3-160 -б). Преклапање приликом обраде дна жлеба је дефинисано вредношћу параметра *Overlap* (Слика 3-160 -б).



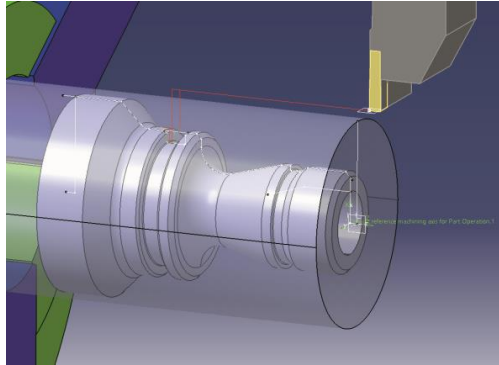
а)



б)

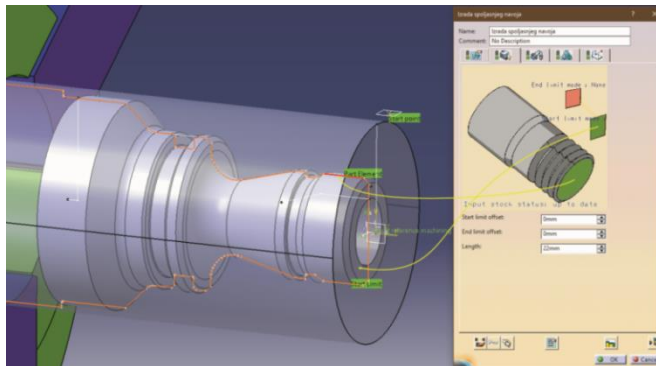
**Слика 3-160** Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват финог усецања спољашњег жлеба (а). Значење термина *Other flank* (остали бокови) (горе) и значење вредности параметра *Clearance* и *Overlap* приликом обраде дна жлеба (доле) (б).

На слици (Слика 3-161) се може видети симулација путање центра врха алата за захват финог усецања спољашњег жлеба.



**Слика 3-161** Симулација путање центра врха алата за захват финог усецања спољашњег жлеба.

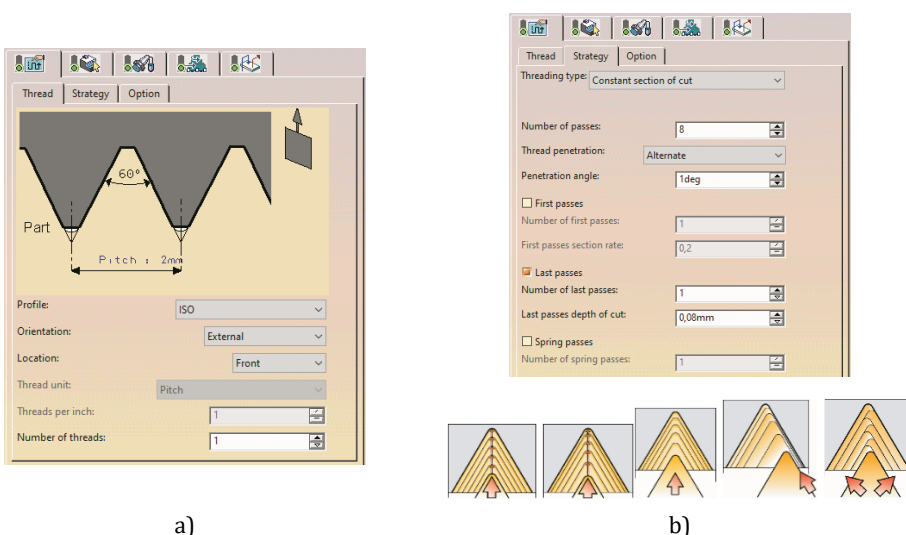
Процедура дефинисања обрадне геометрије за захват **израде спољашњег навоја (*Thread Turning*)** је приказана на слици (Слика 3-162). Неопходно је изабрати само обрадну контуру на изратку. Потребно је такође изабрати чеону површину изратка као почетни елемент обрадне контуре изратка (*Start limit*). За параметар *Start limit mode* треба изабрати вредност *On*. Коначно је потребно дефинисати вредност параметра *Length* (дужина навоја).



**Слика 3-162** Дефинисање обрадне геометрије за захват израде спољашњег навоја.

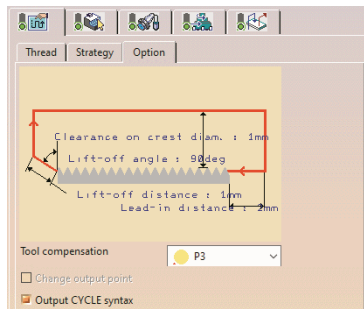
На слици (Слика 3-163) се може видети процедура дефинисања профила, корака, локације и броја почетака навоја и процедура дефинисања параметара стратегије обраде за захват израде спољашњег навоја. Прво је неопходно дефинисати корак навоја (*Pitch*). Затим је неопходно изабрати профил навоја (*Profile*), локацију (*Location*) и дефинисати број почетака навоја (*Number of threads*; 1 за једновојни навој) (Слика 3-163 -

а). Затим је потребно изабрати врсту обраде по питању дубине резања по пролазима (*Threading type* (могуће вредности су *Constant depth of cut* (константна дубина резања по пролазима) и *Constant section of cut* (константан попречни пресек струготине по пролазима; дубина резања по пролазима се смањује))), дефинисати вредност за максималну дубину резања (*Depth of cut* (ако је претходно била изабрана опција *Constant depth of cut*)) или број пролаза (*Number of passes* (ако је претходно била изабрана опција *Constant section of cut*)), изабрати начин уласка алата (*Thread penetration* (могуће вредности су *Straight* (радијални начин уласка), *Oblique* (улазак измењеног бока) и *Alternate* (инкрементални начин уласка))), дефинисати улазни угао (*Penetration angle*), број последњих пролаза (*Number of last passes*), дубину резања за последње пролазе (*Last passes depth of cut*) (Слика 3-163 -б).



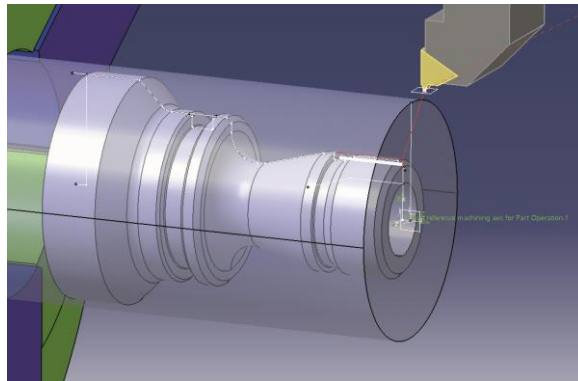
**Слика 3-163** Одређивање профила, корака и броја почетака навоја (а). Одређивање параметара стратегије обраде за захват израде спољашњег навоја (горе) и врсте обраде по питању дубине резања по пролазима и начини уласка алата (доле) (б).

На крају је за захват израде спољашњег навоја потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-164). Потребно је дефинисати безбедно растојање, мерено од врха навоја, за повратак алата између пролаза резања навоја (*Clearance on crest diam.*). Такође је потребно дефинисати компензацију врха алата (*Tool compensation*). Угао правца празног хода при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off angle*) се мери у односу на правац резања.



**Слика 3-164** Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват израде спољашњег навоја.

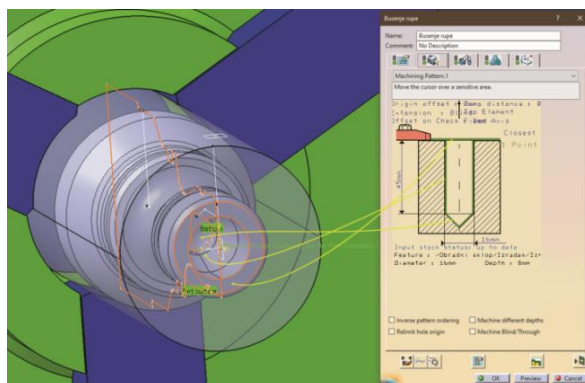
Симулација путање центра врха алата за захват израде спољашњег навоја се може видети на слици (Слика 3-165).



**Слика 3-165** Симулација путање центра врха алата за захват израде спољашњег навоја.

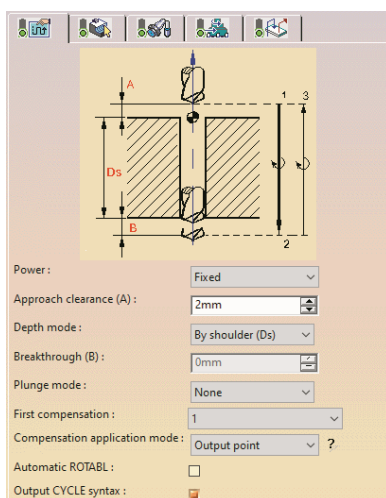
Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **бушења рупе (Drilling)** је приказан на слици (Слика 3-166). Неопходно је изабрати чеону површину изратка као површину од које се мери дубина рупе (*Part surface*), одговарајућу криву којом ће бити дефинисан пречник рупе и површину која представља дно рупе (*Bottom*). Такође је потребно дефинисати да ли се ради о рупи или отвору (параметар *Extension* (могуће вредности су *Blind* (рупа) и *Through* (отвор))). Дефинисањем вредности параметра *Jump distance* уводи се додатно растојање за кретање брзим ходом између рупа или отвора који се буше, у случаје-вима када је ова вредност већа од вредности прилазног растојања (*Approach clearance*). На пример, када је вредност параметра *Approach clearance* 2,5mm, а вредност параметра *Jump distance* 10 mm, онда је додатно растојање за кретање брзим ходом 7,5mm. У случају да се изводи бушење већег броја рупа или отвора, избором опција *Machine different depths* и *Machine Blind/Through*

узима се у обзир стварна дубина и вредност параметра *Extension* за сваку изабрану рупу или отвор, респективно.



Слика 3-166 Дефинисање обрадне геометрије за захват бушења рупе.

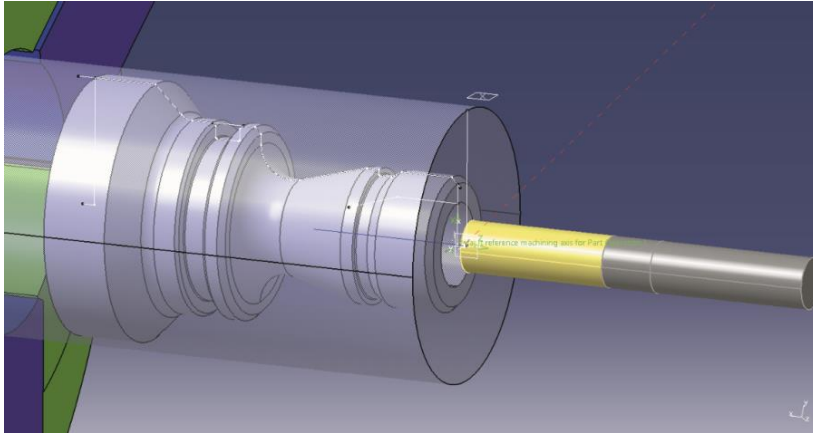
Поступак дефинисања параметара стратегије обраде за захват бушења рупе се може видети на слици (Слика 3-167). У овом случају је потребно дефинисати да ли завојна бургија ротира у току обраде (*Power* (могуће вредности су *Fixed* (завојна бургија не ротира у току обраде, већ ротира обрадак) и *Powered* (завојна бургија ротира у току обраде, а обрадак не ротира))), прилазно растојање (празан ход пре уласка алата у захват са обратком) (*Approach clearance (A)*) и како се мери дубина бушења (*Depth mode* (могуће вредности су *By tip (D<sub>t</sub>)* (у односу на врх бургије) и *By shoulder (D<sub>s</sub>)* (у односу на раме бургије))).



Слика 3-167 Подешавање параметара стратегије обраде за захват бушења рупе.

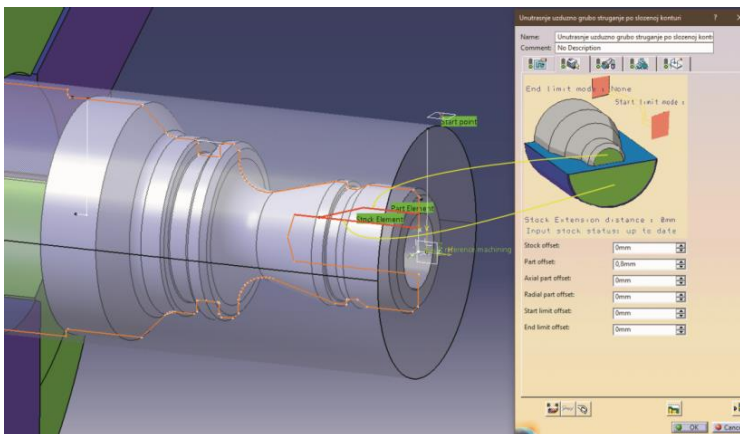


На слици (Слика 3-168) се може видети симулација путање центра врха алата за захват бушења рупе.



Слика 3-168 Симулација путање центра врха алата за захват бушења рупе.

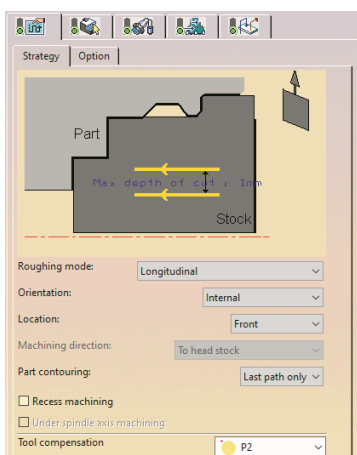
Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (Rough Turning)** се може видети на слици (Слика 3-169). У овом случају је неопходно изабрати обрадну контуру на обратку и једну од обрадних контура на изратку. Дефинисан је и додатак за фину обраду уносом вредности за параметар *Part offset*.



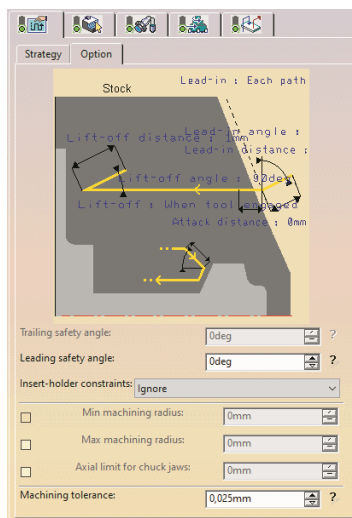
Слика 3-169 Дефинисање обрадне геометрије за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.

Поступак дефинисања параметара стратегије обраде за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури се може видети на слици (Слика 3-170 -а).





а)

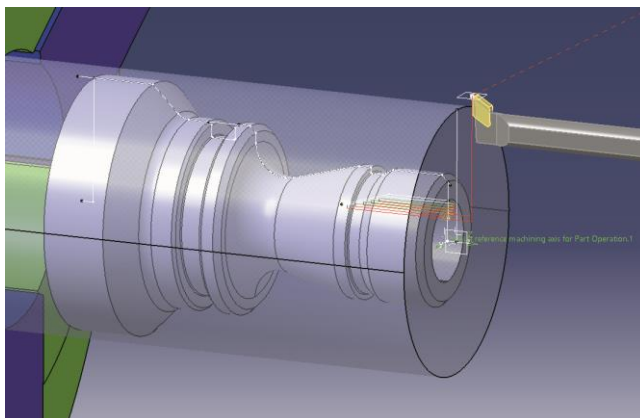


б)

**Слика 3-170** Одређивање параметара стратегије обраде за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (а).  
Одређивање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (б).

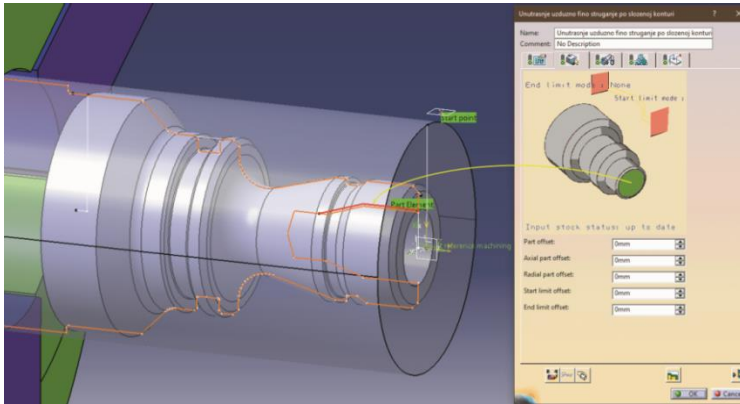
На крају је за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-170 -б).

Симулација путање центра врха алата за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури је приказана на слици (Слика 3-171).



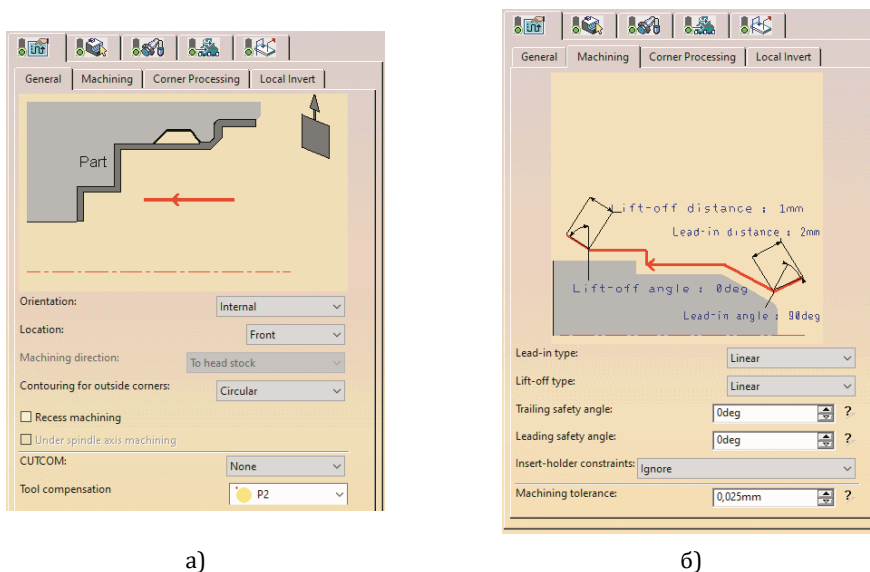
**Слика 3-171** Симулација путање центра врха алата за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.

На слици (Слика 3-172 ) се може видети процедура дефинисања обрадне геометрије за захват **унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (Profile Finish Turning)**. У овом случају је потребно изабрати само обрадну контуру на изратку.



**Слика 3-172** Дефинисање обрадне геометрије за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.

Процедура дефинисања параметара стратегије обраде за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури је приказана на слици (Слика 3-173 -а).



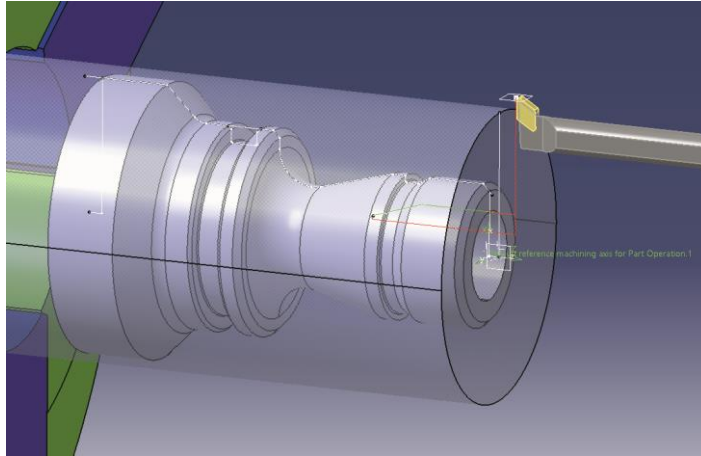
а)

б)

**Слика 3-173** Одређивање параметара стратегије обраде за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (а). Одређивање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (б).

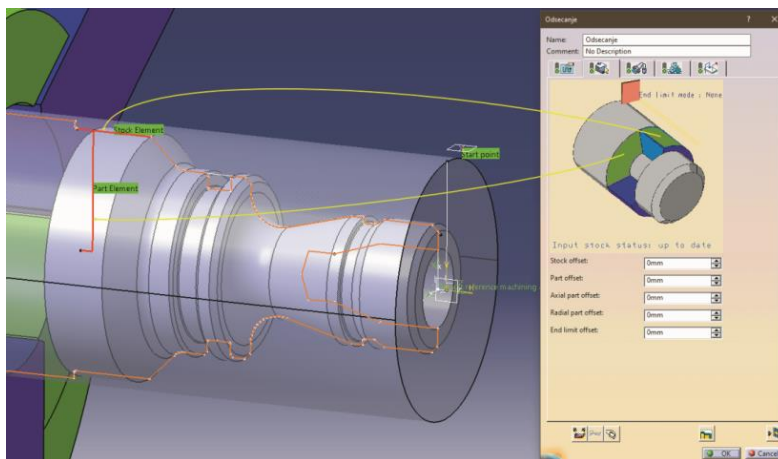
На крају је за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-173 -б).

Слика 3-174 приказује симулацију путање центра врха алата за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.



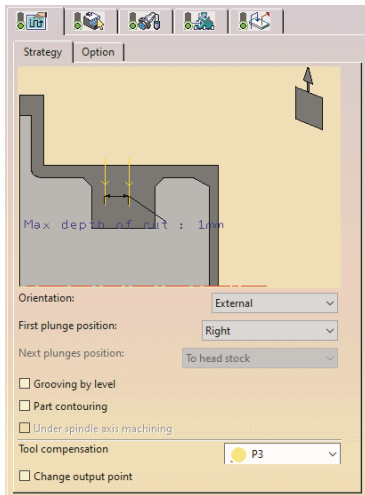
Слика 3-174 Симулација путање центра врха алата за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.

Поступак дефинисања обрадне геометрије за захват **одсецања (Groove Turning)** се може видети на слици (Слика 3-175). Неопходно је изабрати обрадну контуру на обратку и обрадну контуру на изратку.

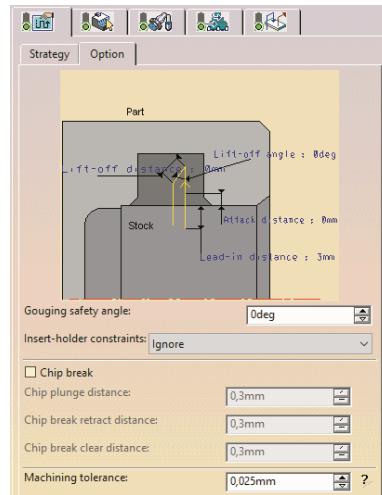


Слика 3-175 Дефинисање обрадне геометрије за захват одсецања.

Процедура дефинисања параметара стратегије обраде за захват одсецања је приказана на слици (Слика 3-176 -а).



а)

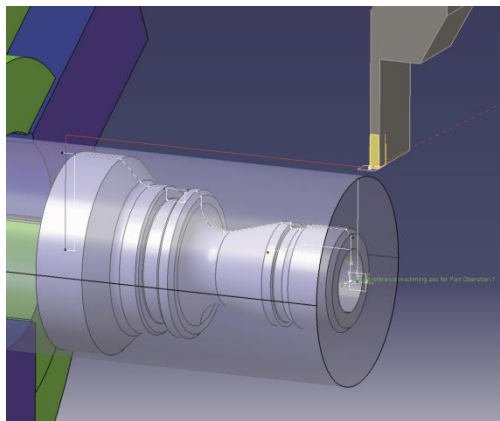


б)

**Слика 3-176** Подешавање параметара стратегије обраде за захват одсецања (а). Подешавање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват одсецања (б).

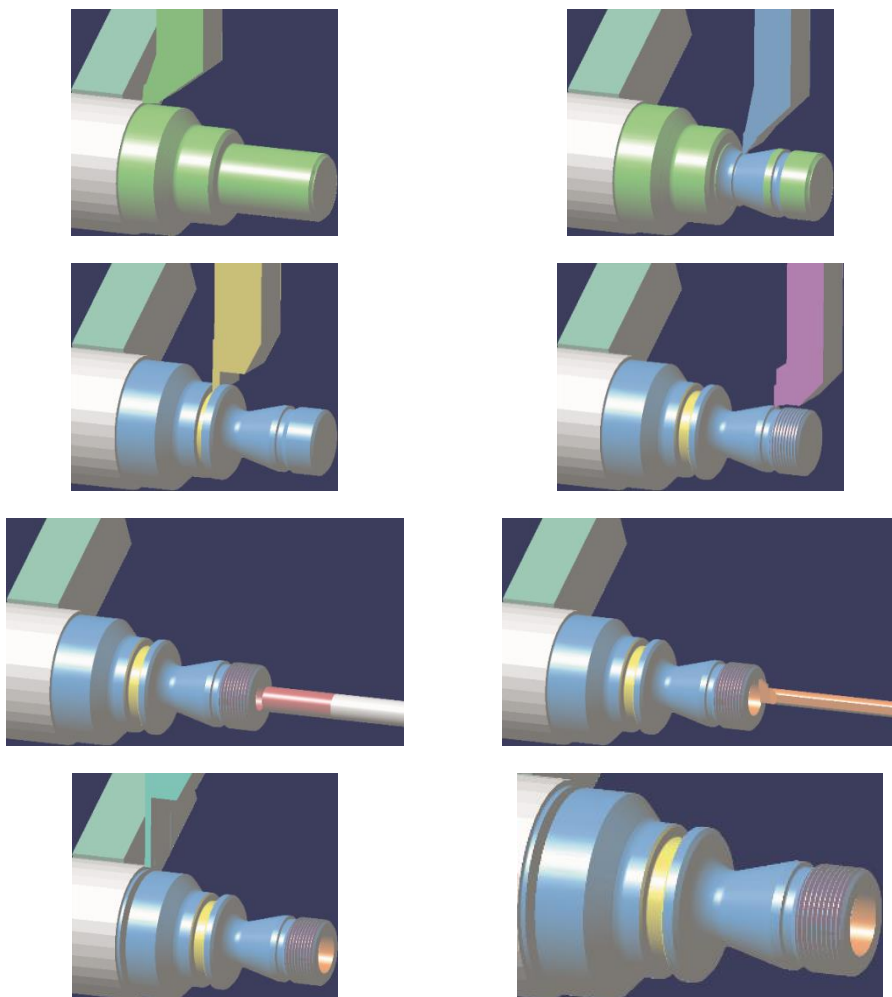
На крају је за захват одсецања потребно дефинисати и параметре који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком (Слика 3-176 -б).

Слика 3-177 приказује симулација путање центра врха алата за захват одсецања.



**Слика 3-177** Симулација путање центра врха алата за захват одсецања.

На слици (Слика 3-178) се могу видети различите фазе видео симулације комплетног производног програма.



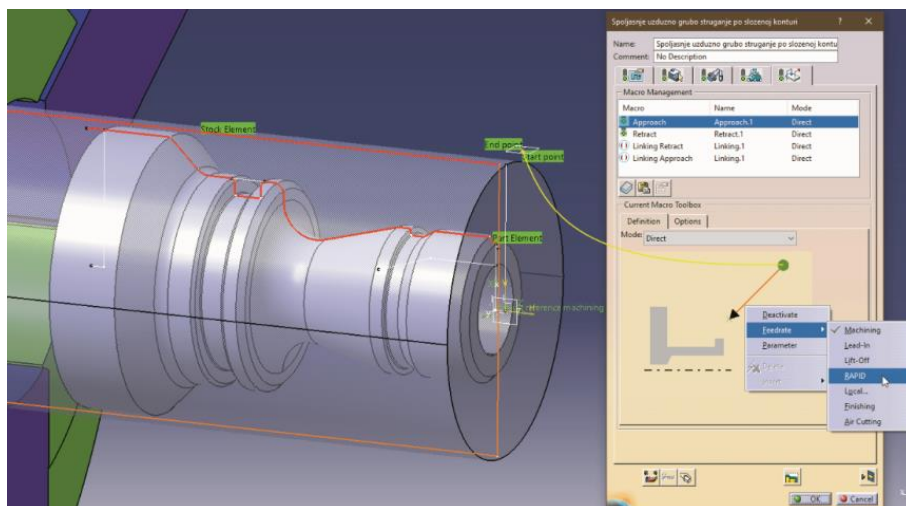
Слика 3-178 Видео симулација комплетног производног програма.

### 3.2.3.3.3 Помоћна (улазно-излазна) кретања алата/обратка

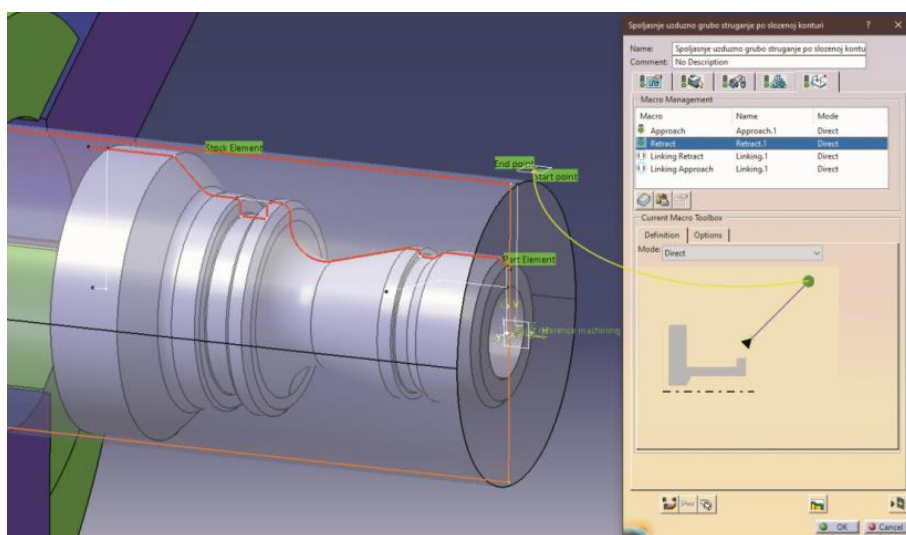
Прилазно кретање (*Approach*) је кретање од почетне тачке (*Start point*), која се налази на безбедној равни, до почетне тачке захвата (тачка од које почиње празан ход пре уласка алата у захват са обратком за први пролаз). Излазно кретање (*Retract*) је кретање од крајње тачке захвата (тачка у којој се завршава празан ход при изласку алата из захвата са обратком за последњи пролаз) до крајње тачке (*End point*), која се налази на безбедној равни. Почетна тачка (*Start point*) и крајња тачка (*End point*) могу бити једна иста тачка. Након измене алат се креће брзим ходом померања у почетну тачку, из које креће у извршење захвата. На крају захвата алат се враћа у крајњу тачку, а затим или креће брзим ходом

померања у тачку за измену алата или креће у извршење следећег захвата. Различити захвати могу користити исту почетну тачку (*Start point*) и крајњу тачку (*End point*). Прилазна и излазна кретања се могу видети на симулацијама путање центра врха алата за захвате.

Прилазна и излазна кретања су имплементирана преко макроа. Дефинисање прилазног кретања подразумева бирање почетне тачке, избор начина кретања (*Mode*), избор корака или брзине кретања и активирање макроа (Слика 3-179 -а). Дефинисање излазног кретања подразумева бирање крајње тачке, избор начина кретања (*Mode*), избор корака или брзине кретања и активирање макроа (Слика 3-179 -б). Постоје три начина кретања: *Direct* (директно; по правој линији) (Слика 3-179 ), *Radial axial* (радијално, па затим аксијално) (Слика 3-180 -а) и *Axial radial* (аксијално, па затим радијално) (Слика 3-180 -б). Приликом избора начина кретања треба узети у обзир врсту захвата и конфигурацију изратка. Избор неодговарајућег начина кретања може резултовати сударом алата и обратка. Прилазно кретање *Axial radial* и излазно кретање *Radial axial* обично се бирају код захвата усецања спољашњег жлеба и одсецања. Прилазно кретање *Radial axial* и излазно кретање *Axial radial* обично се бирају код захвата усецања унутрашњег жлеба, унутрашњег уздужног стругања по сложеној контури и израде унутрашњег навоја. За све остале захвате могу се бирати директна прилазна и излазна кретања. Изузетак је захват бушења рупе (када је у питању центрично бушење), где се прилазно и излазно кретање не дефинише. Прилазно и излазно кретање се може реализовати различитим корацима и брзинама: кораком за грубу обраду (*Machining*), кораком за празан ход пре уласка алата у захват са обратком (*Lead-in*), кораком за празан ход при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off*), брзим ходом померања (*RAPID*), кораком чију вредност дефинише корисник (*Local*), кораком за фину обраду (*Finishing*) и брзином којом се реализују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала (ова брзина је мања од брзине за померање брзим ходом) (*Air Cutting*) (Слика 3-179 -а)). Брзина за померање брзим ходом је један од параметара нумерички управљаног струга. Вредности за преостале кораке и брзине се дефинишу као технолошки параметри. Брзина прилазног и излазног кретања ће утицати на укупно време потребно за реализацију захвата. Са друге стране треба бити опрезан у ситуацијама када је изабран брзи ход померања, нарочито код прилазног кретања.



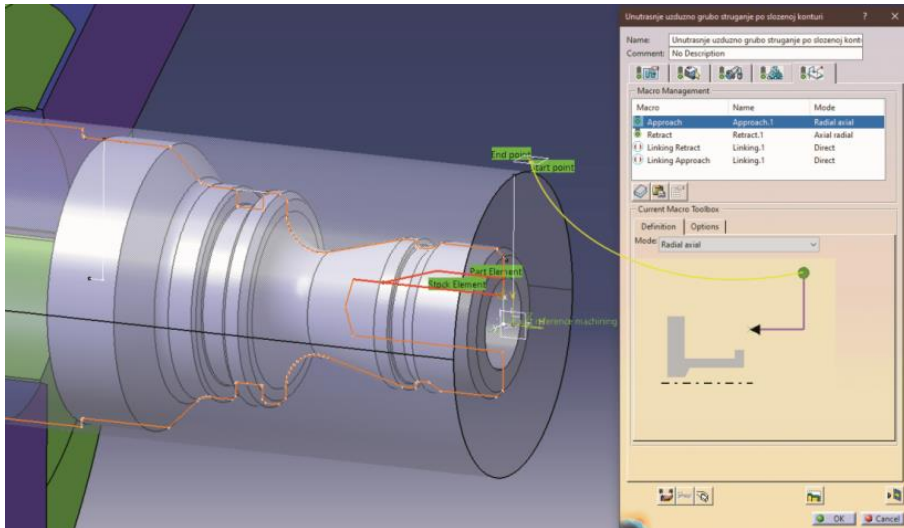
а)



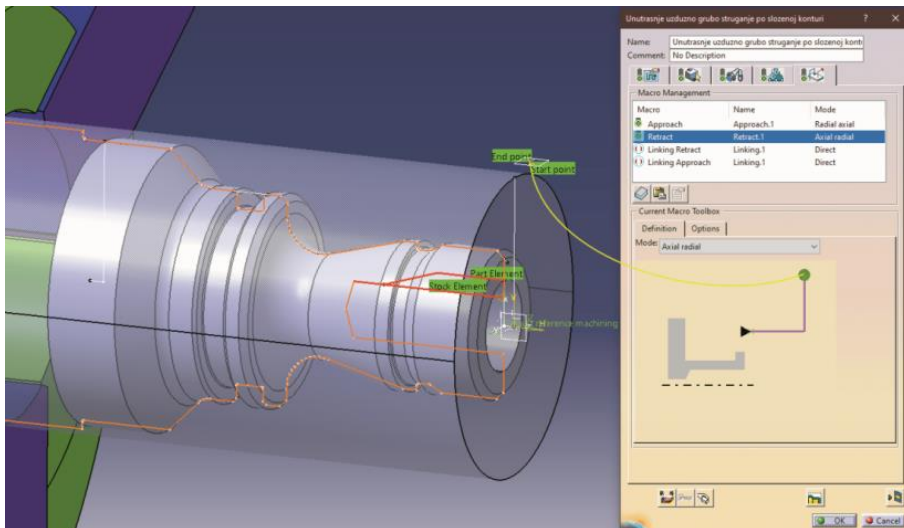
б)

**Слика 3-179** Дефинисање директног прилазног (а) и директног излазног (б) кретања код захвата спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.





a)



б)

**Слика 3-180** Дефинисање прилазног (*Radial axial*) (а) и излазног (*Axial radial*) (б) кретања код захвата унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.

#### 3.2.3.3.4 Параметри обраде (технолошки параметри)

Под параметрима обраде или технолошким параметрима подразумевају се, пре свега, корак (или брзина кретања) за различите фазе кретања алата и брзина резања. Приликом дефинисања изменљиве плочице

алата дефинишу се брзина резања за грубу обраду (*Roughing cutting speed*) и корак за грубу обраду (*Roughing feedrate per tooth*) и, евентуално, брзина резања на фину обраду (*Finishing cutting speed*) и корак за фину обраду (*Finishing feedrate per tooth*) (Слика 3-181 -а). У случају једноделне завојне бургије ове се вредности дефинишу приликом дефинисања алата, с тим што се могу дефинисати брзина резања (*Cutting speed*) или број обртаја главног вретена (*Spindle speed*), и корак по зубу (*Feedrate per tooth*) или корак по обртају (*Feedrate*) (Слика 3-181 -б).

а)

б)

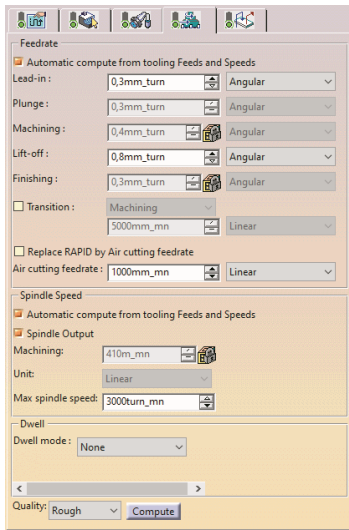
**Слика 3-181** Задавање вредности режима обраде приликом одређивања изменљиве плочице (а). Задавање вредности режима обраде приликом одређивања алата (завојне бургије) (б).

Параметри обраде се дефинишу приликом дефинисања захвата. Избором опције *Automatic compute from tooling Feeds and Speeds* користе се вредности за корак и брзину резања за захвате грубе (*Machining*) и фине (*Finishing*) обраде дефинисане приликом дефинисања алата (изменљиве плочице). Приликом дефинисања вредности корака, могуће је изабрати опцију *Angular* (корак по обртају (mm/o)) и *Linear* (брзина помоћног кретања (mm/min)). Избором опције *Replace RAPID by Air Cutting feedrate*, брзина при померању брзим ходом (*RAPID*) се замењује брзином којом се реализују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала (*Air Cutting*).

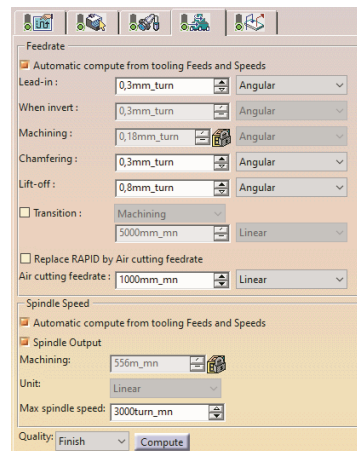
У даљем тексту ће бити описана процедура дефинисања параметара обраде за карактеристичне двоосне захвате код стругања.

Поступак дефинисања параметара обраде за захвате спољашњег попречног и уздужног грубог стругања по сложеној контури (*Rough turning*), затим, израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала (*Recess Turning*) и унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (*Rough turning*) се може видети на слици (Слика 3-182 -а). Неопходно је да се у падајућој листи *Quality* изабере вредност *Rough* и након тога кликне на дугме *Compute*, како би се вредности за корак и брзину резања дефинисане приликом дефинисања алата уписале у поља *Machining* у групама опција *Feedrate* и *Spindle Speed*, респективно. Обратите пажњу на то да су поља *Machining* закључ-

чана. Након тога је потребно унети вредност за корак за празан ход пре уласка алата у захват са обратком (*Lead-in*), корак за празан ход при изласку алата из захвата са обратком (*Lift-off*), брзину којом се реализују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала (*Air Cutting*), и максималан број обртаја главног вретена (*Max spindle speed*). Може се изабрати и вредност за параметар *Dwell mode* (задржавање (привремено заустављање кретања) алата на крају пролаза (могуће вредности су: *None* (нема задржавања), *By revolutions* (задржавање је изражено у броју обртаја) и *By time units* (задржавање је изражено у временским јединицама (секундама)))).



a)



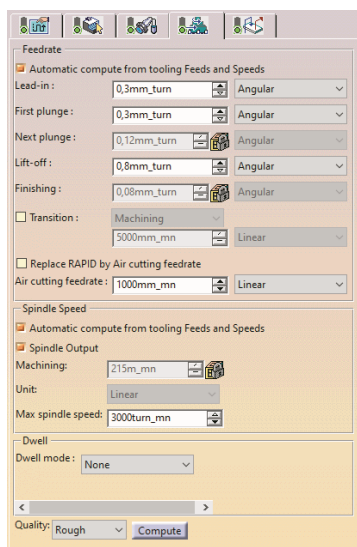
b)

**Слика 3-182** Процедура дефинисања параметара обраде за захвате спољашњег попречног и уздужног грубог стругања, израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала и унутрашњег уздужног грубог стругања (а). Процедура дефинисања параметара обраде за захвате спољашњег и унутрашњег уздужног финог стругања (б).

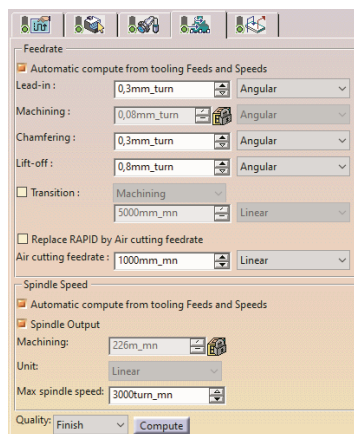
Поступак дефинисања параметара обраде за захвате спољашњег и унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (*Profile Finish Turning*) је приказан на слици (Слика 3-182 -б). Неопходно је да се у падајућој листи *Quality* изабере вредност *Finish* и након тога кликне на дугме *Compute*, како би се вредности за корак и брзину резања дефинисане приликом дефинисања алата уписале у поља *Machining* у групама опција *Feedrate* и *Spindle Speed*, респективно. Након тога је потребно унети вредност за корак за празан ход пре уласка алата у захват са обратком, корак приликом обраде оборених ивица (*Chamfering*), корак за празан ход при изласку алата из захвата са обратком, брзину којом се реали-

зују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала, и максималан број обртаја главног вретена.

Процедура дефинисања параметара обраде за захвате грубог усецања спољашњег жлеба и одсецања (*Groove Turning*) је приказана на слици (Слика 3-183 -а). Неопходно је да се у падајућој листи *Quality* изабере вредност *Rough* и након тога кликне на дугме *Compute*, како би се вредности за корак и брзину резања дефинисане приликом дефинисања алата уписале у поље *Next plunge* у групи опција *Feedrate* и *Machining* у групи опција *Spindle Speed*, респективно. Након тога је потребно унети вредност за корак за празан ход пре уласка алата у захват са обратком, корак за прво продирање алата у материјал (*First plunge*), корак за празан ход при изласку алата из захвата са обратком, брзину којом се реализују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала, и максималан број обртаја главног вретена. Може се изабрати и вредност за задржавање (привремено заустављање кретања) алата на крају пролаза.



а)



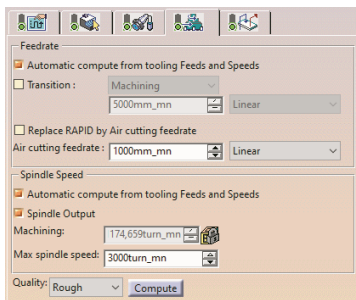
б)

**Слика 3-183** Процедура дефинисања параметара обраде за захвате грубог усецања спољашњег жлеба и одсецања (а). Процедура дефинисања параметара обраде за захват финог усецања спољашњег жлеба (б).

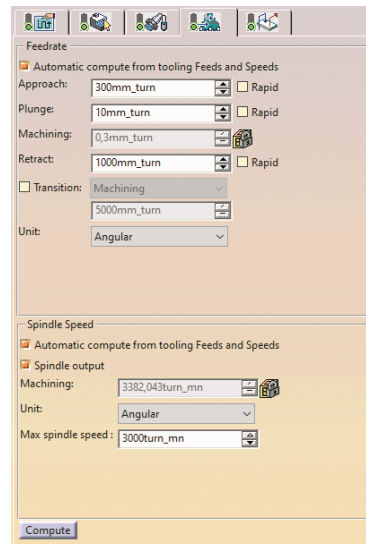
Поступак дефинисања параметара обраде за захват финог усецања спољашњег жлеба се може видети на слици (Слика 3-183 -б). Неопходно је да се у падајућој листи *Quality* изабере вредност *Finish* и након тога кликне на дугме *Compute*, како би се вредности за корак и брзину резања дефинисане приликом дефинисања алата уписале у поља *Machining* у

групама опција *Feedrate* и *Spindle Speed*, респективно. Након тога је потребно унети вредност за корак за празан ход пре уласка алата у захват са обратком, корак приликом обраде оборених ивица, корак за празан ход при изласку алата из захвата са обратком, брзину којом се реализују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала, и максималан број обртаја главног вретена.

Поступак дефинисања параметара обраде за захват израде спољашњег навоја (*Thread Turning*) је приказан на слици (Слика 3-184 -а). Неопходно је да се у падајућој листи *Quality* изабере вредност *Rough* и након тога кликне на дугме *Compute*, како би се вредност за брзину резања дефинисана приликом дефинисања алата уписала у поље *Machining* у групи опција *Spindle Speed*. Након тога је потребно унети вредности за брзину којом се реализују повратна кретања између пролаза захвата, када нема уклањања материјала, и максималан број обртаја главног вретена.



a)



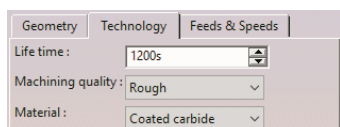
b)

**Слика 3-184** Процедура дефинисања параметара обраде за захват израде спољашњег навоја (а). Процедура дефинисања параметара обраде за захват бушења рупе (б).

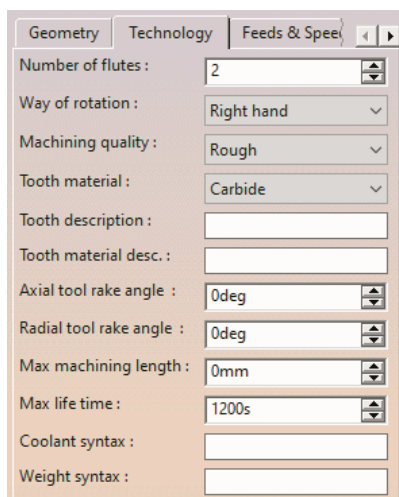
Процедура дефинисања параметара обраде за захват бушења рупе (*Drilling*) је приказана на слици (Слика 3-184 -б). Неопходно је кликнути на дугме *Compute* како би се вредности за корак и брзину резања дефинисане приликом дефинисања алата уписале у поља *Machining* у групама опција *Feedrate* и *Spindle Speed*, респективно. Након тога је потребно унети вредност за корак за прилазно кретање (*Approach*), продирање алата у материјал (*Plunge*), излазно кретање (*Retract*) и максималан број обртаја

главног вретена. Уколико се изабере опција *Rapid* за прилазно и излазно кретање, иста ће бити реализована брзим ходом померања.

Приликом дефинисања алата такође се дефинишу неки од технолошких параметара. За изменљиве плочице се уноси очекивана постојаност за унете режиме (*Life time*), бира квалитет обраде (*Machining quality* (могуће вредности су *Rough* (груба обрада), *Finish* (фина обрада) и *Either* (груба и фина обрада))) и материјал (*Material*) (Слика 3-185 -а). За завојну бургију се, поред ових технолошких параметара, може унети и број завојних жлебова (*Number of flutes*) (Слика 3-185 -б).



а)



б)

**Слика 3-185** Задавање додатних технолошких параметара приликом одређивања: (а) изменљиве плочице, (б) алата (једноделне завојне бургије).

Додатни технолошки параметри се дефинишу и приликом дефинисања појединих држача. Код држача алата за усецање жлеба и држача алата за одсецање уноси се вредност за максималну дубину резања (*Max cut depth* ( $a_r$ )) (Слика 3-186 -а). У случају држача алата за усецање жлеба овај параметар представља максималну дубину жлеба, коју је могуће израдити. У случају држача алата за одсецање, овај параметар представља максималан полупречник обратка који је могуће одсећи. Код држача алата за унутрашње уздужно стругање уносе се вредности за минималан пречник рупе или отвора (*Min diameter*) и максималну дубину обраде (*Max boring depth*) (Слика 3-186 -б).



Geometry	Technology	Compensation
Max machining length :	0mm	
Max life time :	0s	
Coolant syntax :		
Weight syntax :		
Max cut width :	1000mm	
Max cut depth (ar):	45mm	
Gouging angle :	90deg	

а)

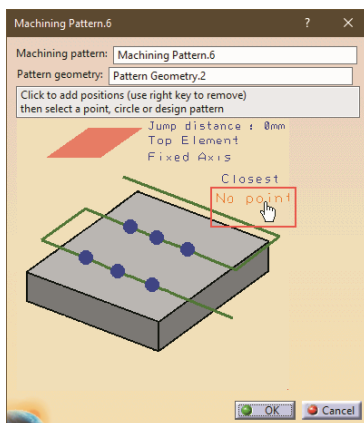
Geometry	Technology	Compensation
Max machining length :	0mm	
Max life time :	0s	
Coolant syntax :		
Weight syntax :		
Min diameter :	15mm	
Max boring depth :	40mm	
Max recessing depth :	1000mm	
Leading angle :	90deg	
Trailing angle :	90deg	

б)

**Слика 3-186** Задавање додатних технолошких параметара приликом одређивања држача алата за: (а) одсецање, (б) унутрашње уздужно стругање.

### 3.2.3.3.5 Измена стезања/оријентације, трансформације и уређени низови захвата

Приликом креирања захвата где се врши обрада линеарног или ротационог низа производних техничких елемената постоје два приступа. Први приступ подразумева креирање новог низа производних техничких елемената приликом креирања захвата, бирањем низа геометријских техничких елемената из стабла модела. Други приступ подразумева креирање низа производних техничких елемената (*Machining Pattern*) пре креирања захвата (Слика 3-187) и накнадно бирање истог из падајуће листе приликом креирања захвата.



а)



б)

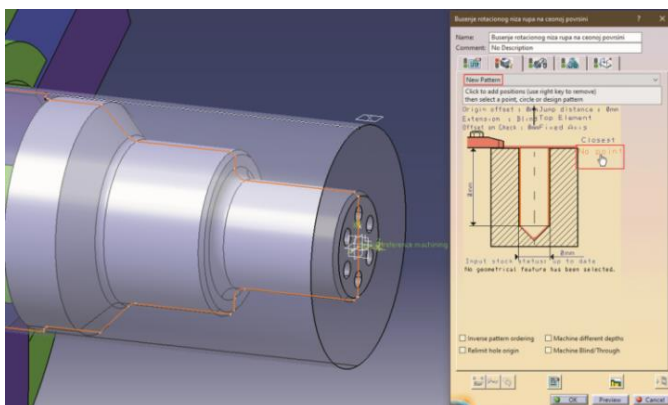
**Слика 3-187** Креирање низа производних техничких елемената:  
а) Почетак процедуре, б) Бирање низа геометријских техничких елемената.



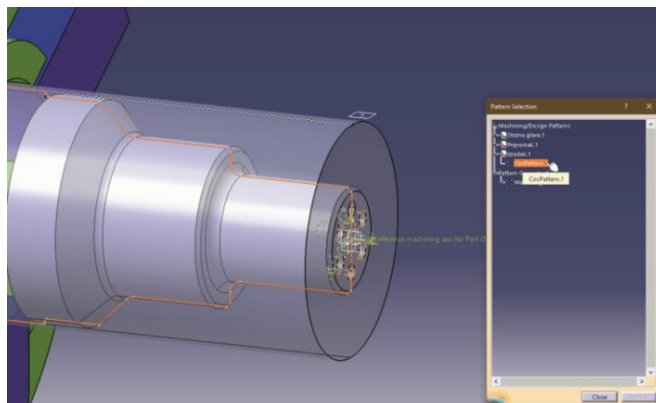
У даљем тексту ће бити описана процедура дефинисања обрадне геометрије и параметара који се односе на стратегију обраде за захват **бушења ротационог низа рупа на чеоној површини (Drilling)**. Све рупе имају исти пречник и дубину. За захват ће такође бити приказана и симулација путање центра врха алата.

Процедура дефинисања обрадне геометрије се може видети на слици (Слика 3-188). У овом случају се у току дефинисања обрадне геометрије креира нови низ производних техничких елемената (ротациони низ рупа на чеоној површини) (*New Pattern*) избором ставке *No Point* (Слика 3-188 -а), коме следи избор одговарајућег низа геометријских техничких елемената у стаблу модела (Слика 3-188 -б). Код приступа када се пре креирања захвата креира низ производних техничких елемената, процедура дефинисања обрадне геометрије би подразумевала бирање низа производних техничких елемената из падајуће листе.

а)

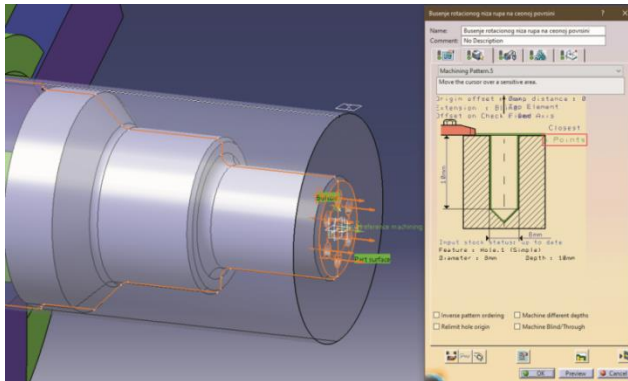


б)



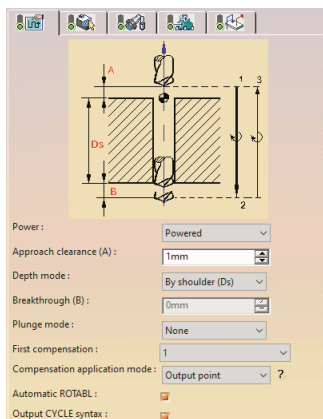
**Слика 3-188** Креирање новог низа производних техничких елемената (ротациони низ рупа на чеоној површини) (а). Бирање одговарајућег низа геометријских техничких елемената у стаблу модела (б).

У даљем току дефинисања обрадне геометрије неопходно је изабрати чеону површину издатка као површину од које се мери дубина рупа и површину која представља дно рупе (Слика 3-189). Може се видети да су аутоматски препознати пречник и дубина рупа и да има укупно шест рупа у низу. У случају да се изводи бушење више низова рупа или отвора, избором опција *Machine different depths* и *Machine Blind/Through* узима се у обзир стварна дубина и вредност параметра *Extension* за сваки изабрани низ рупа или отвора, респективно.



Слика 3-189 Дефинисање обрадне геометрије за захват бушења ротационог низа рупа на чеоној површини.

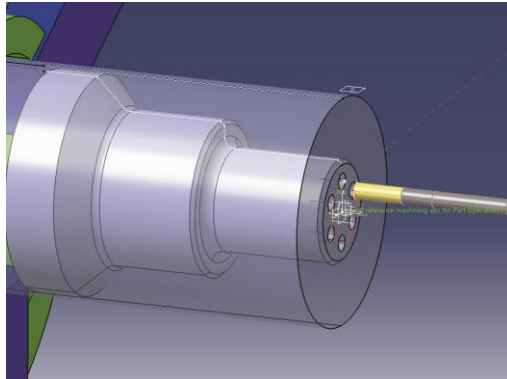
Процедура дефинисања параметара „стратегије” обраде се може видети на слици (Слика 3-190). У овом случају је потребно дефинисати да завојна бургија ротира у току обраде (користи се погоњени алат) (за параметар *Power* је изабрана вредност *Powered*), прилазно растојање (празан ход пре уласка алата у захват са обратком) и да ли се дубина бушења мери у односу на врх или раме бургије.



Слика 3-190 Дефинисање параметара стратегије обраде за захват бушења ротационог низа рупа на чеоној површини.

Потребно је изабрати опцију *Automatic ROTABL*. Овим се дефинише да се захват реализује на троосном стругу, где се алат позиционира по  $X$  и  $Z$  оси у почетну тачку, а затим следе захвати бушења између којих обрада ротира око  $Z$  осе ( $C$  оса) за  $60^\circ$ .

Симулација путање центра врха алата за захват бушења ротационог низа рупа на чеоној површини је приказан на слици (Слика 3-191).

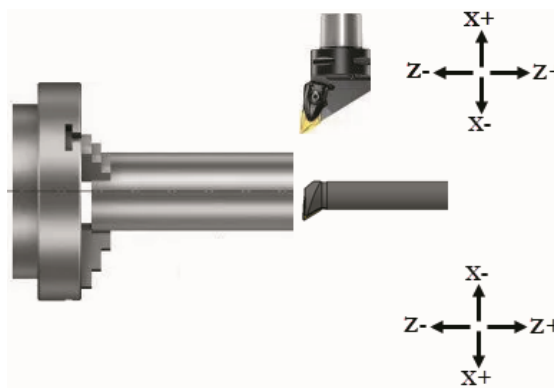


Слика 3-191 Симулација путање центра врха алата за захват бушења ротационог низа рупа на чеоној површини.

### 3.2.3.4 Моделирање високо-продуктивних захвата

#### 3.2.3.4.1 Групни захвати и вишевретене машине

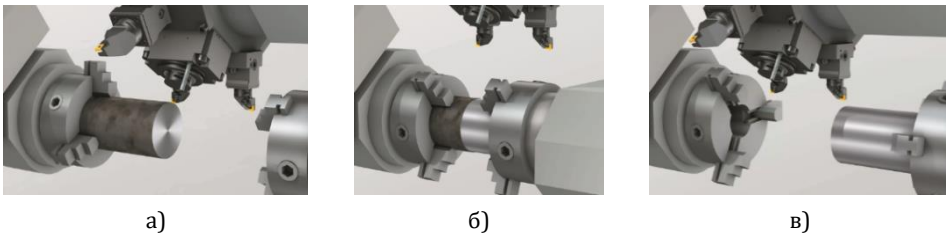
У случајевима када је део могуће израдити у једном стезању и када је неопходно вршити и спољашњу и унутрашњу обраду, укупно време потребно за израду дела је могуће скратити, уколико се обрада врши на нумерички управљаном стругу који има два носача алата (најчешће две револверске главе) и једно вретено (Слика 3-192).



Слика 3-192 Обрада на нумерички управљаном стругу који има два носача алата (један је испред осе обратка (унутрашња обрада), а други је иза осе обратка (спољашња обрада)) и једно вретено.

Најчешће се један носач алата користи за спољашњу обраду, а други за унутрашњу обраду. Неопходно је креирати два производна програма (сваки носач алата има свој производни програм). Спољашња и унутрашња обрада се могу вршити истовремено, односно захвати спољашње и унутрашње обраде се могу извршавати симултано. Главни проблем је у томе што се два захвата извршавају симултано са истим бројем обртаја главног вретена у датом тренутку. Другим речима, није могуће реализовати жељену брзину резања за оба захвата.

У случајевима када су потребна два стезања за израду дела, укупно време потребно за израду дела је могуће скратити уколико се обрада врши на нумерички управљаном стругу који има два вретена (примарно или главно вретено (*Spindle*) и секундарно вретено (*Subspindle*)). Непосредно пре одсецања, или након завршене обраде у првом стезању (Слика 3-193 -а), врши се аутоматско стезање обратка у стезној глави секундарног вретена (Слика 3-193 -б). Након тога се наставља обрада у другом стезању (са друге стране обратка) (Слика 3-193 -в). Секундарно вретено се налази насупрот главном вретену. Нумерички управљани стругови са два вретена могу имати један (Слика 3-193) или два носача алата.



**Слика 3-193** Обрада на нумерички управљаном стругу који има два вретена и један носач алата: (а) обрада у првом стезању, (б) аутоматско стезање обратка у стезној глави секундарног вретена, (в) обрада у другом стезању.

Укупно време потребно за израду дела у два стезања може се значајно скратити уколико се обрада врши на нумерички управљаном стругу који има два вретена и два носача алата (Слика 3-194). Ова врста стругова има и *bar feeder* (уређај који врши отпуштање припремка, извлачење истог испред стезне главе (примарног вретена) на одговарајућу дужину и поновно стезање). Један носач алата се користи за обраду у првом стезању, а други за обраду у другом стезању. Обраде у првом и другом стезању врше се истовремено (обрада у првом стезању новог дела и обрада у другом стезању претходног дела). Неопходно је креирати два производна програма (сваки носач алата има свој производни програм).

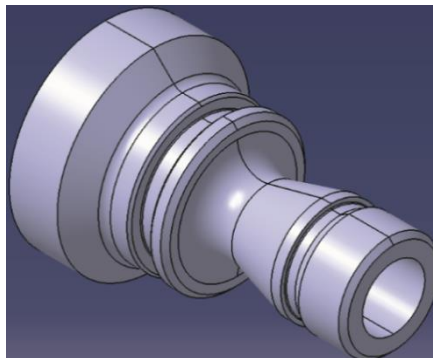


**Слика 3-194** Обрада на нумерички управљаном стругу који има два вретена и два носача алата.

#### **3.2.3.4.2 Моделирање групног захвата обраде (*multi turret operation*)**

Процедура моделирања групних захвата обраде биће представљена на конкретном примеру. Геометријски модел изратка је приказан на слици (Слика 3-195 ). Највећи пречник изратка је 80 mm, а дужина је 120 mm. Пречник припремка је 85 mm. За израду овог дела потребно је једно стезање. Приликом обраде истог неопходно је извршити девет захвата:

- спољашње попречно грубо стругање чеоне површине,
- спољашње уздужно грубо стругање по сложеној контури,
- уклањање заосталог материјала,
- израда спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја,
- грубо усецање спољашњег жлеба,
- израда спољашњег навоја,
- бушење рупе,
- унутрашње уздужно грубо стругање по сложеној контури и
- одсецање.



**Слика 3-195** Геометријски модел изратка који ће бити коришћен као пример приликом моделирања групних захвата обраде.

Укупно време потребно за израду дела на стругу са једним вретеном и једним носачем алата је 142,45 s.

У даљем тексту ће бити описана процедура моделирања групних захвата обраде на стругу са једним вретеном и два носача алата. Основна идеја је да се, ради уштеде времена, у што је могуће већој мери реализује истовремена израда више површина са више алата. У том смислу, потребно је донети одлуку о томе који ће се захвати реализовати алатима са горњег, а који алатима са доњег носача алата. Један од приступа подразумева да се захвати спољашње обраде реализују алатима са горњег, а унутрашње (укључујући и захват бушења рупе) алатима са доњег носача алата. Укупно време обраде потребно за израду дела би се у том случају скратило на 114,73 s, па би уштеда у односу на време потребно за израду дела на стругу са једним вретеном и једним носачем алата била 19,46%. Међутим, лако је уочити значајну разлику између укупног времена потребног за спољашњу обраду и укупног времена потребног за унутрашњу обраду у конкретном случају. Може се закључити да се укупно време обраде потребно за израду дела може додатно скратити тако што ће се, поред захвата унутрашње обраде, алатима са доњег носача алата реализовати и поједини захвати спољашње обраде. Приликом доношења одлуке о томе који ће се захвати спољашње обраде реализовати алатима са доњег носача алата, треба узети у обзир укупно време потребно за извршење појединих захвата и могућности истовремене израде више површина са више алата.

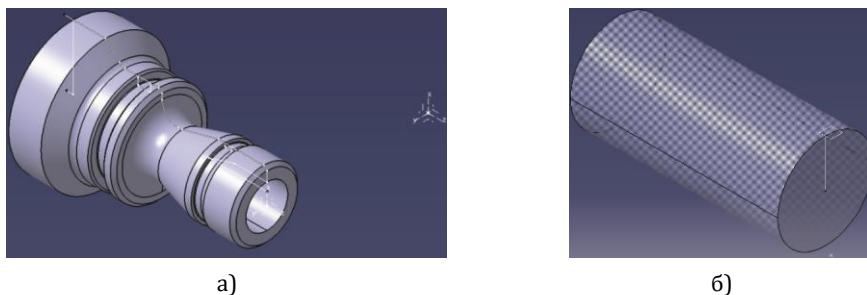
За део који се анализира је одлучено да се алатима са горњег носача алата реализују следећи захвати:

- спољашње попречно грубо стругање чеоне површине,
- спољашње уздужно грубо стругање по сложеној контури,
- уклањање заосталог материјала и
- одсецање.

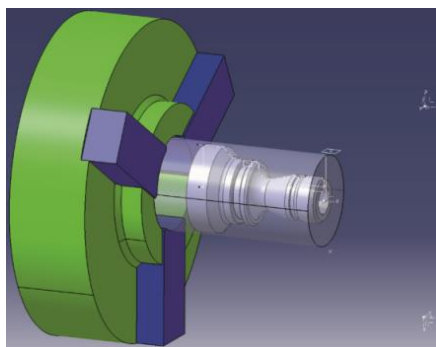
На нивоу геометријског модела издатка је, у односу на претходно анализиран сличан пример (Слика 3-196 -а) потребно додати хоризонталну линију код спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја, која ће приликом креирања захвата бити изабрана као обрадна контура на обратку. То је разлог због чега, приликом креирања захвата који ће бити реализовани алатима са доњег носача алата, опција ажурирања контуре обратка неће бити доступна. Из истог разлога је на нивоу геометријског модела издатка потребно додати и хоризонталну линију која ће приликом креирања захвата унутрашњег уздужног стругања по сложеној контури бити изабрана као обрадна контура на обратку. Коначно је на нивоу геометријског модела издатка потребно додати и два координатна

система који ће бити изабрани приликом дефинисања параметара нумерички управљаног струга као координатни системи носача алата. Почетак ових координатних система налази се у тачки за измену алата. На слици (Слика 3-196 -а) се могу видети обрадне контуре и координатни системи на нивоу издатка. Обратити пажњу на оријентацију координатних система који ће бити изабрани као координатни системи носача алата. На нивоу геометријског модела припремка је, у односу на претходно анализиран сличан пример (Слика 3-196 -б) потребно додати само тачку која ће бити изабрана као почетна тачка приликом дефинисања прилазног кретања на нивоу захвата, односно крајња тачка приликом дефинисања излазног кретања на нивоу захвата, за захвате који се реализују алатима са доњег носача алата. На слици (Слика 3-196 -б) се може видети обрадна контура, раван и тачке на нивоу припремка.

На слици (Слика 3-197) се може видети обрадни склоп.



**Слика 3-196** Обрадне контуре и координатни системи на нивоу издатка (а).  
Обрадна контура, раван и тачке на нивоу припремка (б).

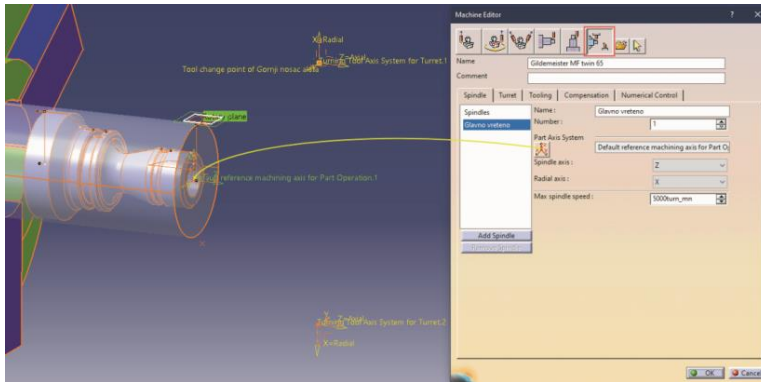


**Слика 3-197** Обрадни склоп код моделирања групних захвата обраде на нумерички управљаном стругу са једним вretenом и два носача алата.

Приликом креирања операције обраде стругањем се, у односу на раније описану процедуру, на другачији начин дефинишу параметри нумерички управљаног струга. У овом случају потребно је прво изабрати врсту машине алатке, дефинисати назив произвођача и модел машине,

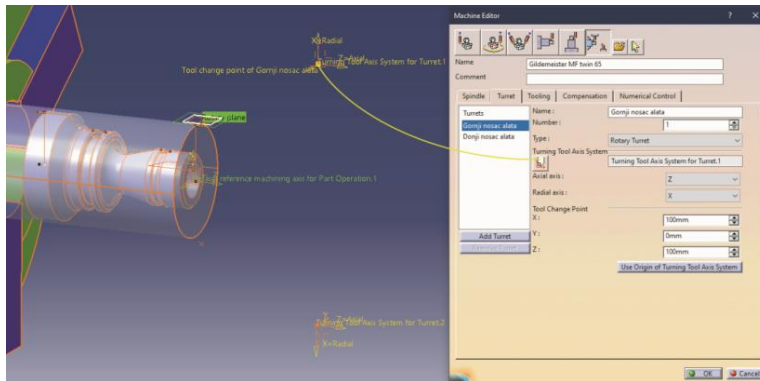


назив главног вретена, изабрати координатни систем обратка, осу главног вретена и радијалну осу и дефинисати максималан број обртаја главног вретена (Слика 3-198).

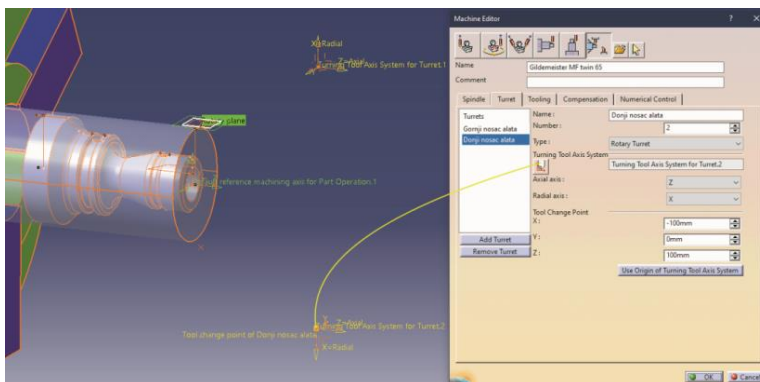


**Слика 3-198** Дефинисање параметара нумерички управљаног струга са једним вретеном и два носача алата. Дефинисање параметара за главно вретено.

а)



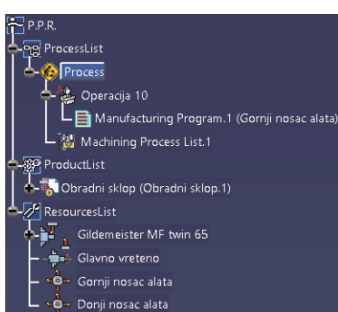
б)



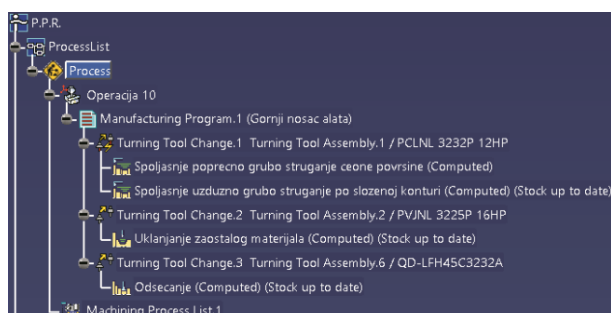
**Слика 3-199** Дефинисање параметара: (а) горњег носача алата, (б) доњег носача алата.

Затим је за сваки носач алата потребно дефинисати назив, изабрати координатни систем носача алата, осу главног вретена и радијалну осу и дефинисати координате тачке за измену алата (координате почетка координатног система носача алата могу се преузети као координате тачке за измену алата кликом на дугме *Use Origin of Turning Tool Axis System*) (Слика 3-199).

У стаблу модела, у оквиру гране која се односи на операцију, бива креиран и производни програм за горњи носач алата (Слика 3-200 -а). Након тога је потребно креирати захвате који ће се реализовати алатима са горњег носача алата (Слика 3-200 -б). Обратите пажњу на редослед захвата.

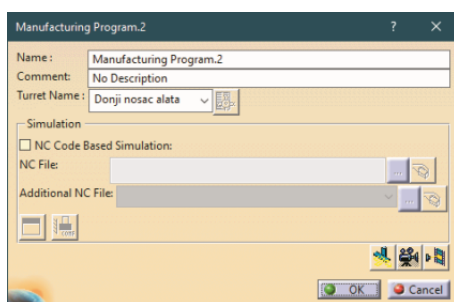


а)

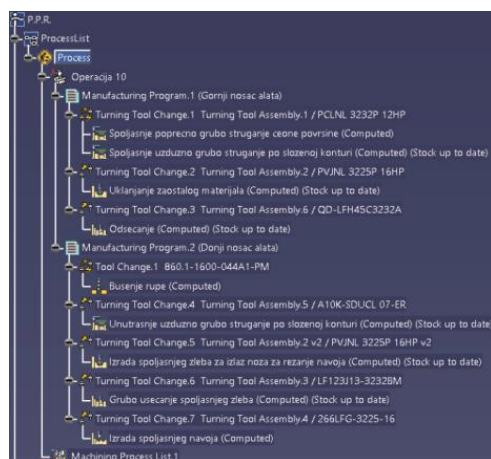


б)

**Слика 3-200** Аутоматско креирање производног програма за горњи носач алата (а). Креирани захвати који ће се реализовати алатима са горњег носача алата (б).



а)

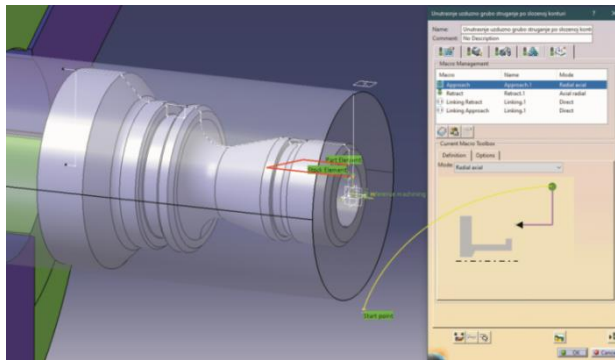


б)

**Слика 3-201** Креирање производног програма за доњи носач алата (а). Креирани захвати који ће се реализовати алатима са доњег носача алата (грана *Manufacturing Program.2*) (б).

Након дефинисања производног програма за горњи носач алата потребно је креирати производни програм за доњи носач алата. Приликом креирања производног програма за доњи носач алата потребно је само изабрати исти у падајућој листи *Turret Name* (Слика 3-201 -а). Коначно следи креирање захвата који ће се реализовати алатима са доњег носача алата (Слика 3-201 -б). Обратити пажњу на редослед захвата.

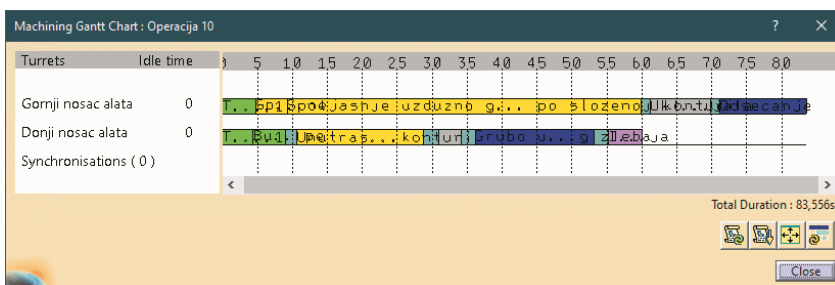
Приликом дефинисања прилазних и излазних кретања за све захвате који ће се реализовати алатима са доњег носача алата, потребно је бирати новокреирану тачку на нивоу геометријског модела припремка као почетну, односно крајњу тачку (Слика 3-202).



**Слика 3-202** Дефинисање прилазног (*Radial axial*) кретања код захвата унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури, који се реализује алатом са доњег носача алата.

### 3.2.3.4.3 Временско усклађивање групног захвата обраде (*Gantt diagram*)

*Gantt*-ов дијаграм даје преглед свих производних програма (са припадајућим захватима) са заједничком временском линијом. Исти се може користити за оптимизацију (прецизније минимизирање) укупног времена потребног за израду дела. У оквиру *Gantt*-овог дијаграма постоји могућност синхронизације (временског усклађивања) захвата код групних захвата обраде.

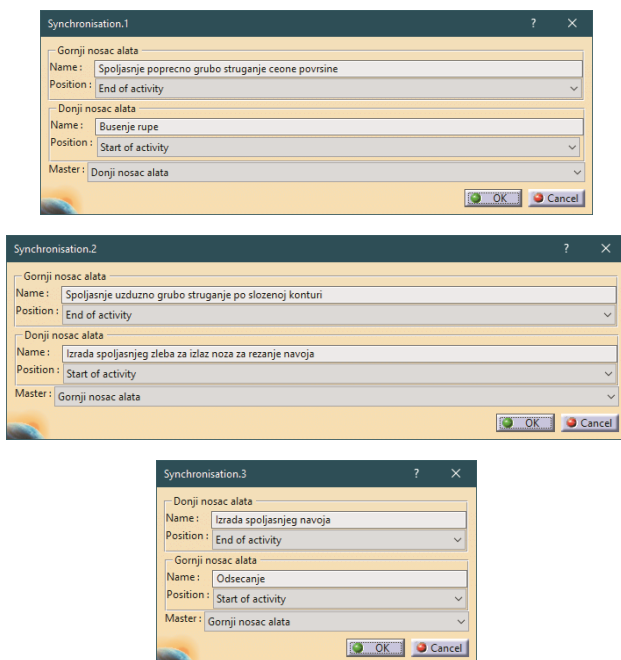


**Слика 3-203** *Gantt*-ов дијаграм непосредно после креирања захвата.

Након креирања свих захвата у оба производна програма подразумева се да се производни програми извршавају паралелно, то јест извршење програма почиње у истом тренутку и на нивоу програма се сви захвати извршавају један за другим по редоследу креирања (Слика 3-203).

С обзиром на то да се алатима са доњег носача алата реализују сви захвати унутрашње обраде и поједини захвати спољашње обраде, паралелним извршавањем производних програма, на начин представљен на *Gantt*-овом дијаграму (Слика 3-203), неће се добити тражена геометрија издатка и, што је важније, у појединим захватима ће доћи до судара алата и обратка. Због тога је неопходно извршити синхронизације захвата.

Приликом синхронизације захвата бирају се два захвата који се желе синхронизовати, затим се за сваки од захвата бира позиција (*Position* (могуће вредности су *Start of activity* (пре прве тачке путање алата) и *End of activity* (после последње тачке путање алата))) и коначно се бира који ће носач алата дефинисати брзину резања (број обртаја главног вретена) (*Master*).

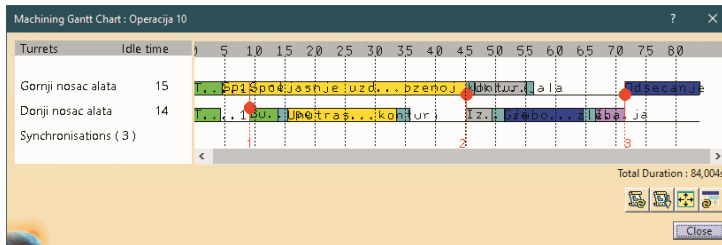


Слика 3-204 Синхронизације захвата.

Извршене су три синхронизације (Слика 3-204): 1) након завршетка спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине почиње бушење рупе, 2) након завршетка спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури почиње израда спољашњег жлеба за излаз ножа за

резање навоја и 3) након завршетка израде спољашњег навоја почиње одсецање.

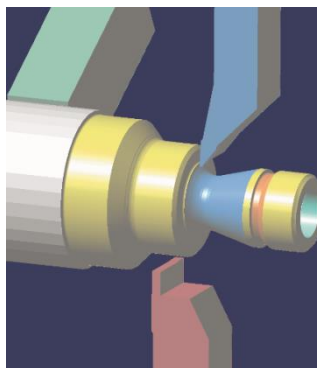
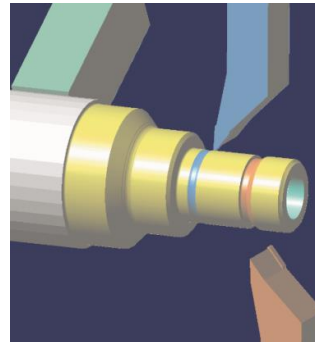
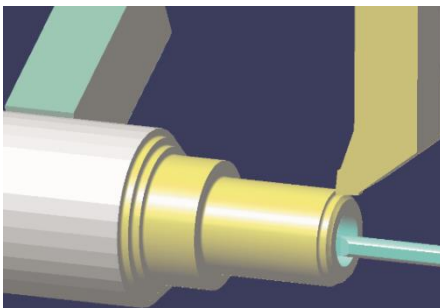
На слици (Слика 3-205) се може видети изглед *Gantt*-овог дијаграма након извршених синхронизација захвата.



Слика 3-205 *Gantt*-ов дијаграм након извршених синхронизација захвата.

Укупно време обраде потребно за израду дела је коначно **84s**. Уштеда у односу на време потребно за израду дела на стругу са једним вretenом и једним носачем алата је **41,03%**.

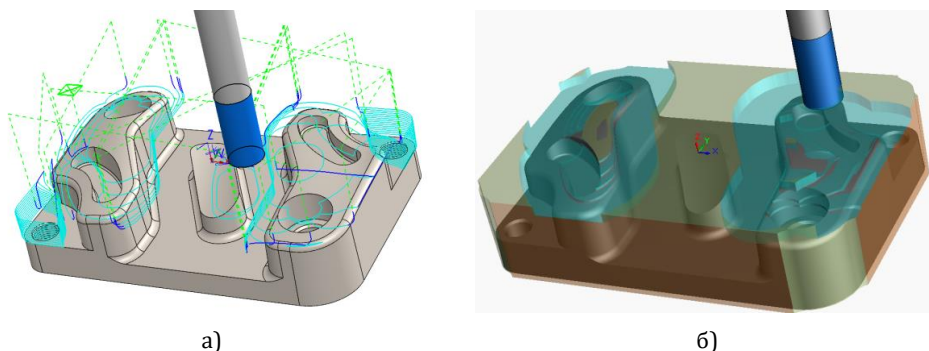
Поједине фазе анимације уклањања запремине оба производна програма у којима се реализују групни захвати обраде су приказани на слици (Слика 3-206).



Слика 3-206 Анимација уклањања материјала при групном захвату.

### 3.3 СИМУЛАЦИЈА И АНАЛИЗА

Након што се заврши са моделирањем захвата обраде, неопходно је проверити *изводљивост* и *ваљаност* захвата. Подсећања ради, *изводљивост* модела захвата подразумева да су одлике захвата подешене тако да *CAPP/CAM* апликација може да симулира обраду и обави анимацију кретања алата и уклањања материјала. *Ваљаност* или *квалитет* моделираног захвата пак подразумева у којој мери захват (који је *изводљив*) остварује тзв. кључне показатеље технолошког учинка, као што су, на пример, циљана брзина уклањања запремине и циљана храпавост. Две највеће користи од коришћења *CAPP/CAM* апликација су: 1) могућност да се на релативно једноставан и интуитиван начин (за човека/инжењера) изради извршни код којим се управља производним средствима (машином, алатима), како би се обавила сложена машинска обрада материјала са циљаним *квалитетом* и 2) могућност да се обави симулација дигиталних модела операција и захвата обраде, односно да инжењер визуелизује моделирану операцију или захват у виртуелном простору.



**Слика 3-207** Анимација релативног кретања алата и обратка у захвату:  
(а) приказ детаља путање алата, (б) приказ уклањања материјала.

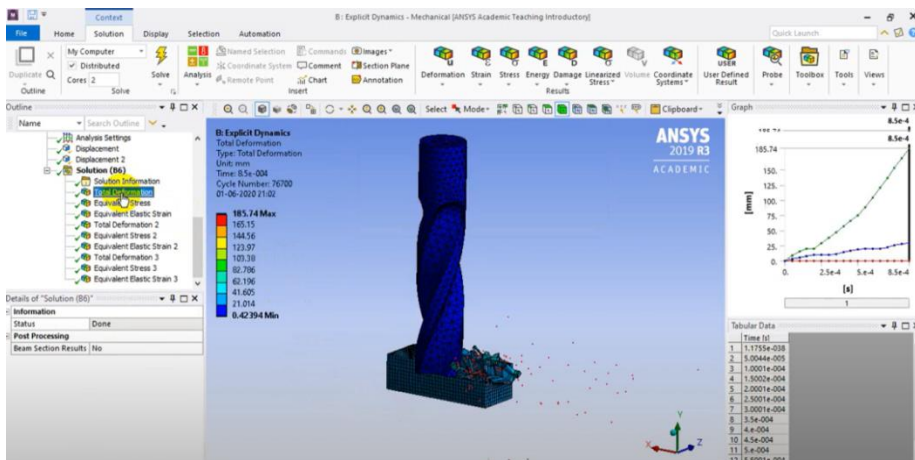
Симулација моделираних захвата и операција машинске обраде у *CAPP/CAM* апликацијама подразумева анимацију кретања алата и обратка која може бити приказана на два, визуелно, различита начина:

1. приказ релативног кретања алата и обратка са свим детаљима путање алата, укључујући геометријске елементе путање (тачке, линије, криве) и технолошке одлике путање (нпр. помаке, брзине). Уједно, овај начин приказа доноси и додатне информације о путањи алата које могу бити од интереса као што су места недозвољеног задирања, време трајања релативног кретања алата и обратка и дужину путање (Слика 3-207-а);



- приказ релативног кретања алата и обратка уз симулацију уклањања материјала (Слика 3-207 -б). У овом виду приказа, могуће је добити податке о одступањима добијених површина у односу на моделирану геометрију.

Треба споменути и тренд који се скоро појавио - да се у *CAPP/CAM* апликације укључе и додатни модули (*add-in*-ови) из класе *CAE* софтвера који омогућавају да се врши симулација сила резања и анализе њиховог утицаја на алат, носач алата и обрадак. На пример, могуће је нумерички анализирати деформације и вибрације алата и обратка у захвату (Слика 3-208). На тај начин се пружа још више могућности у погледу визуелизације обраде и анализе моделираних захвата.



Слика 3-208 Симулација глодања у *CAE* Ansys софтверу (експлицитна динамичка анализа).<sup>23</sup>

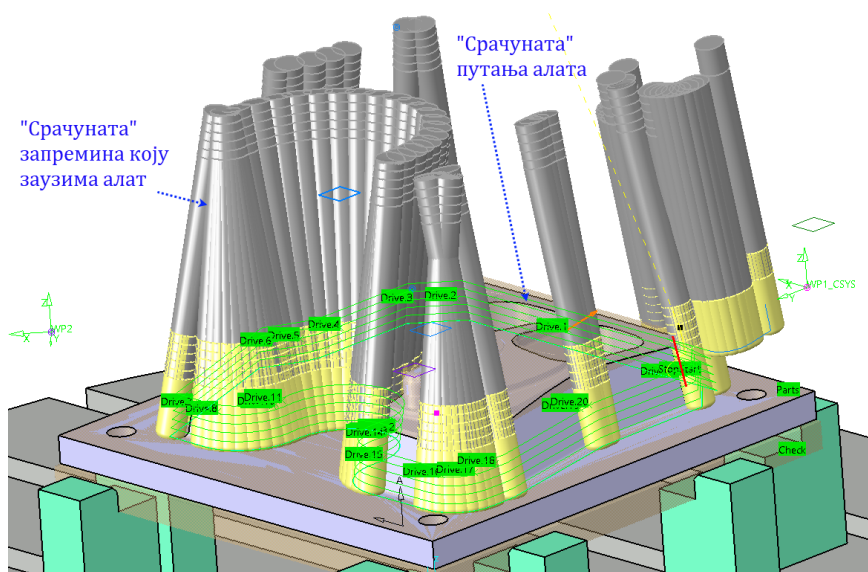
### 3.3.1 ВИЗУЕЛИЗАЦИЈА ЗАХВАТА И ОПЕРАЦИЈА

Визуелизација дигиталног модела операције и захвата обраде у „виртуелном простору“ могуће је обавити након што се подеси или зада минимално потребан скуп одговарајућих одлика операција и захвата. То подразумева да је потребно имати подешен најмањи могући број одлика модела операција и захвата да би *CAPP/CAM* апликација могла да спроведе симулацију релативног кретања алата и обратка. Међутим, то не значи да треба тежити да се операције и захвати моделирају са минимално потребних детаља, већ да је тај ниво детаљности довољан *CAPP/CAM* апликацији да обави симулацију релативног кретања и, као што је већ више пута наглашено, такав захват и операција се сматрају *изводљивим*.

<sup>23</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=ncCFGkez74Q>



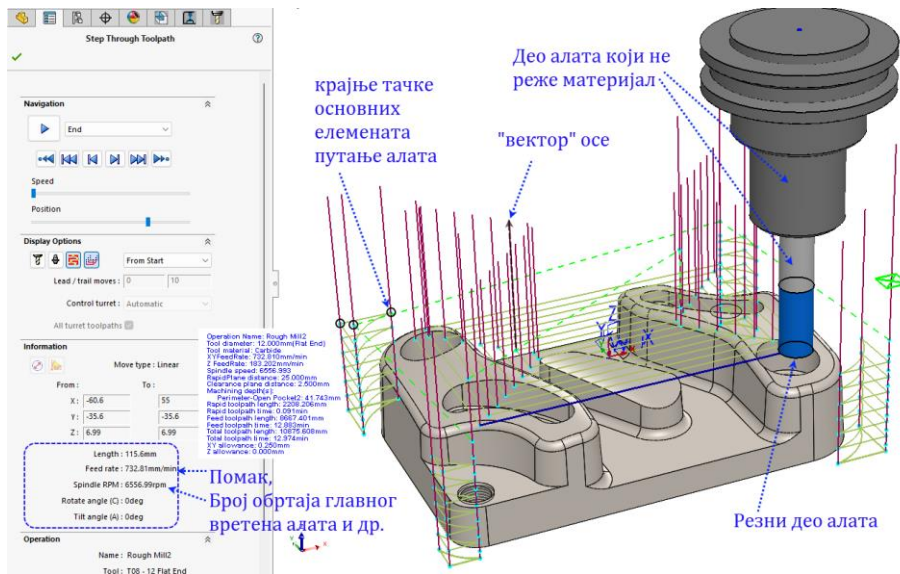
У реалној пракси, при моделирању обрадних радњи, управо треба тежити оптималној детаљности која ће, са једне стране, бити таква да омогућава да се симулира све што може бити од значаја за разматрање и утврђивање степена *ваљаности* захвата, а са друге, да не буде узрок несврхисходно уложеног напора и времена. У првом кораку визуелизације, *CAPP/CAM* апликација врши срачунавање или одређивање „геометријских места“ која чине путању алата и то се често назива генерацијом (*toolpath generation*) или срачунавањем путање (*toolpath calculation*). Истовремено са путањом, врши се и срачунавање запремине која је при кретању алата била „заузета“ резним делом алата и делом алата и држача који не учествују у уклањању материјала. Срачунавање запремине коју је алат заузимао током кретања по путањи је потребно како би се утврдило да ли је долазило до недозвољеног задирања запремине алата у израдак или у запремине других делова, као што су делови машине и стезног алата и прибора (Слика 3-209).



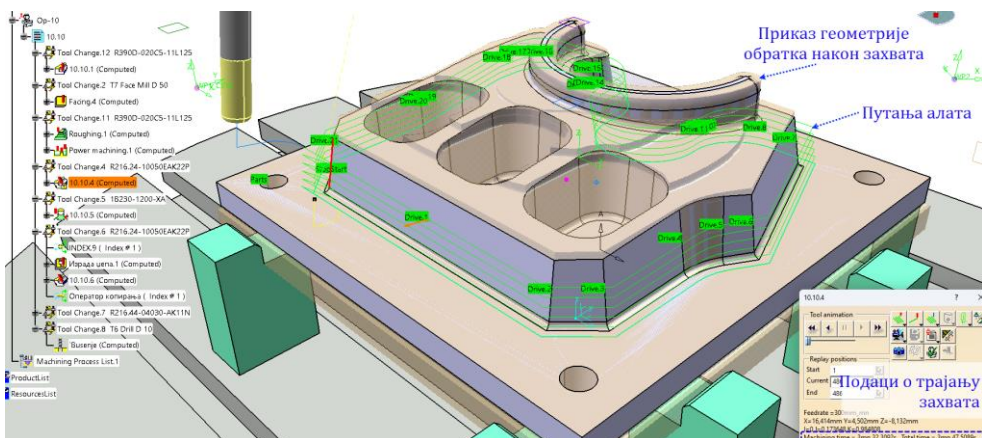
**Слика 3-209** Приказ резултата „срачунавања“ геометријских места путање алата и запремине коју алат заузима обилазећи путању алата на начин који је моделиран.

Након што се изврши срачунавање релативног кретања алата и обратка у захвату, *CAPP/CAM* апликација може да спроведе анимацију кретања у виртуелном простору производног склопа и визуелно га прикаже инжењеру ради анализирања и провере ваљаности. У зависности од *CAPP/CAM* апликације, различите су могућности приказа детаља везаних за релативно кретање алата и обратка у захвату. Скоро увек је могуће представити све геометријске елементе путање алата: основне право-

линијске или криволинијске елементе путање и њихове крајње (одредишне) тачке, смер осе алата и сам алат у свакој од тих одредишних тачака путање (Слика 3-210, Слика 3-211). Уједно, често је могуће добити и низ додатних информација попут помака, броја обртаја главног вретена (алата), вредности углова чеоног и бочног нагиба алата у свакој тачки путање, време трајања захвата, и то, подељено на *главно време* - док је алат у захвату, док непосредно врши резање, и *укупно време*, које укључује *главно* и *помоћно време* - када се алат креће по путањи, али не реже материјал (помоћна кретања).



Слика 3-210 Приказ детаља анимације релативног кретања алата и обратка у захвату (CAM модул Solid Works PLM софтвера).

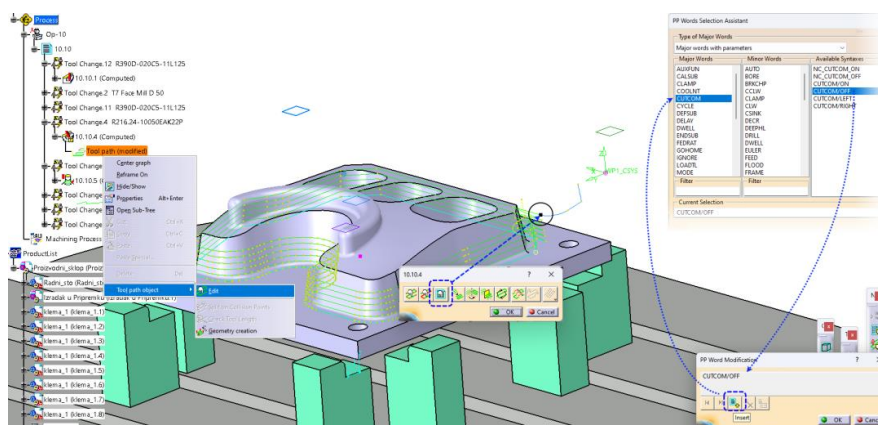


Слика 3-211 Приказ детаља анимације релативног кретања алата и обратка у захвату (CAM модул Catia PLM софтвера).

Након што се изврши анимација релативног кретања алата и обратка и „исцрта“ путања алата у виртуелном простору производног склопа, могуће је вршити читав низ анализа. Најпре, могуће је визуелно прегледати сваки детаљ кретања алата и обратка у 3D приказу што је од великог значаја са сагледавање ваљаности моделираног захвата обраде. Затим, могуће је проверити одређене вредности технолошких одлика (брзина резања, помак) за сваку тачку путање, као и битна одстојања попут додатака за обраду (Слика 3-212). Такође, могуће је брисати поједине елементе путање, али и уметати додатне елементе у делу помоћног кретања.



Слика 3-212 Приказ прегледа и измене технолошких одлика на деловима путање.

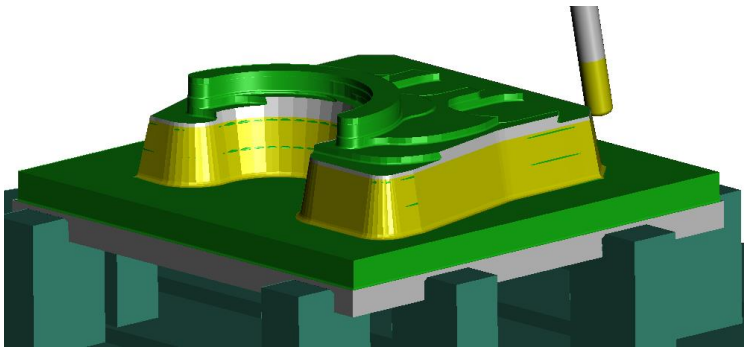


Слика 3-213 Задавање пост-процесорских инструкција у изабраној тачки са генерисане путање алата.

Коначно, могуће је унети одговарајуће тзв. пост-процесорске инструкције (директиве) које су потребне како бисмо још детаљније контролисали спровођење обраде у стварности. На пример, могуће је,

након извесног пролаза алата (од значаја) унети пост-процесорску директиву за опционо заустављање: *OPSTOP\ON* (M01 у G-коду), као и „укључити” или „искључити” радијалну компензацију полупречника глодала: G41/G42/G40 (Слика 3-213) и сл.

Други вид анимације којим се визуелизује обрада произилази из симулације уклањања материјала при релативном кретању алата и обратка. Приликом покретања овог вида симулације, *CAPP/CAM* апликација врши срачунавање или одређивање запремине која остаје након што алат „уклони” материјал током свог кретања по путањи. Тек са овом визуелизацијом могуће је видети како ће део изгледати након сваког захвата (Слика 3-214). Треба рећи да савремене *CAPP/CAM* апликације омогућавају срачунавање „привремене” геометрије обратка која је резултат претходних или текућег захвата и у току моделирања захвата (Слика 3-211).

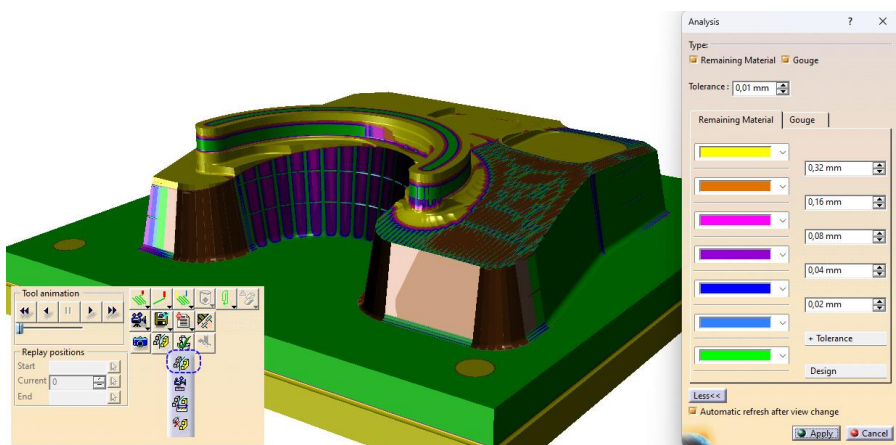


**Слика 3-214** Изглед и запремина обратка након низа захвата обраде.

Ипак, најважнији део овог вида симулације је могућност анализе, односно утврђивања одступања облика обратка и издатка у односу на моделирану геометрију дела која је пројектована. Тиме је могуће, са великом тачношћу, сагледати величину одступања облика који настаје моделираним захватима и спрам тих података изменити одлике захвата (нпр. релативног кретања алата и обратка или геометрије алата), да би се постигао циљани квалитет обраде, односно тачност облика и димензија издатка. Треба имати на уму да приликом ове симулације *CAPP/CAM* апликација обавља нумеричко срачунавање преостале запремине у складу са задатом резолуцијом срачунавања, а то значи да се срачунавање не обавља континуално у времену већ у дискретним тренуцима. Што су периоди између секвенци срачунавања запремине краћи то ће и тачност облика обратка која је срачуната у овој симулацији више одговарати стварности. Наравно, то захтева значајне рачунарске ресурсе, али инжењери треба да, у зависности од важности овог корака, подесе резо-

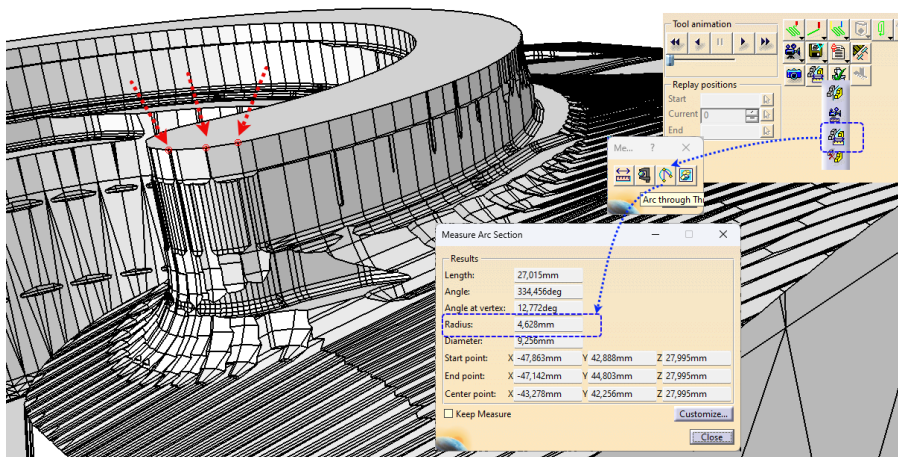


луцију срачунавања облика обратка у току обраде. Коначно, не треба заборавити да је потребно подесити и резолуцију приказа у виртуелном простору *CAPP/CAM* апликације, како нас одлике приказа геометрије (са слабијом резолуцијом) не би заварале грубим формама. Секвенце анализе одступања добијеног облика обратка од моделиране геометрије издатка су приказане на слици (Слика 3-215). Одступања су приказана разврстана у обојене разреде према одређеним границама одступања.



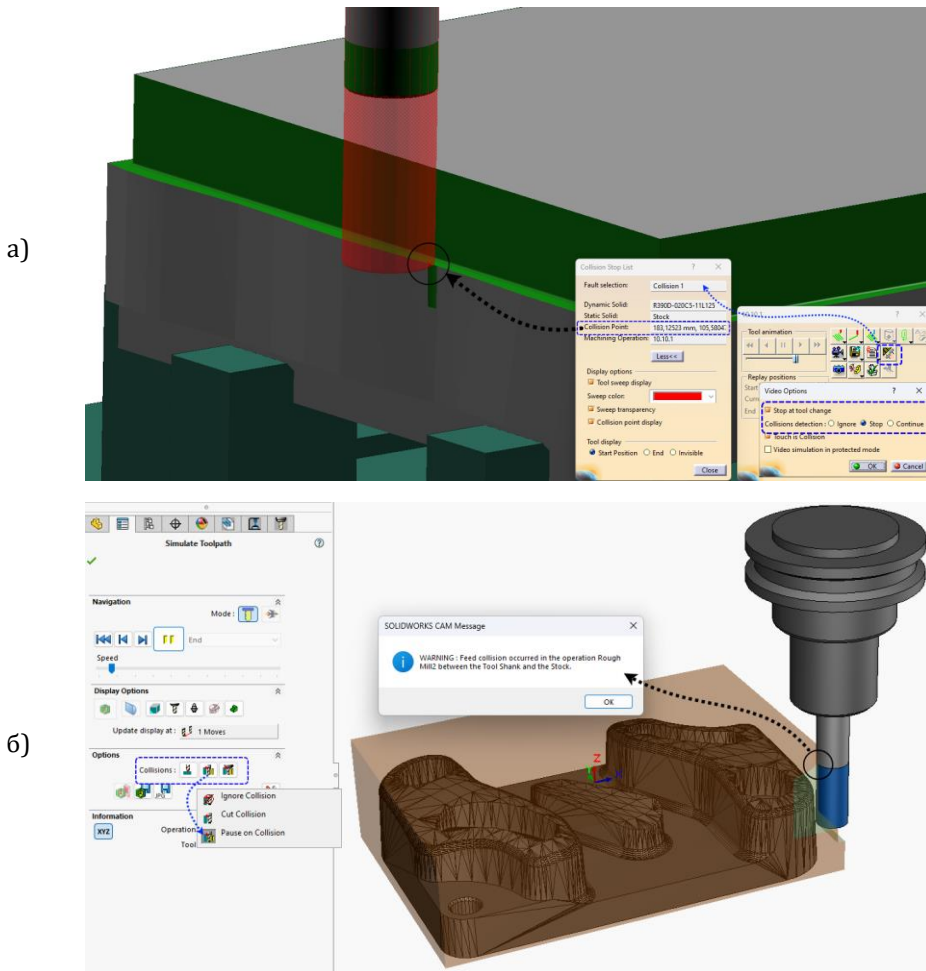
**Слика 3-215** Приказ анализе одступања облика обратка у одређеној фази обраде у односу на моделирану геометрију издатка.

Приликом анализе геометрије запремине обратка након визуелизације уклањања запремине, могуће је спроводити и тзв. виртуелна мерења непосредно на запреминском моделу обратка.



**Слика 3-216** Приказ спровођења виртуелних мерења појединих детаља (радијуса лука на обратку) на моделу у одређеној фази обраде.

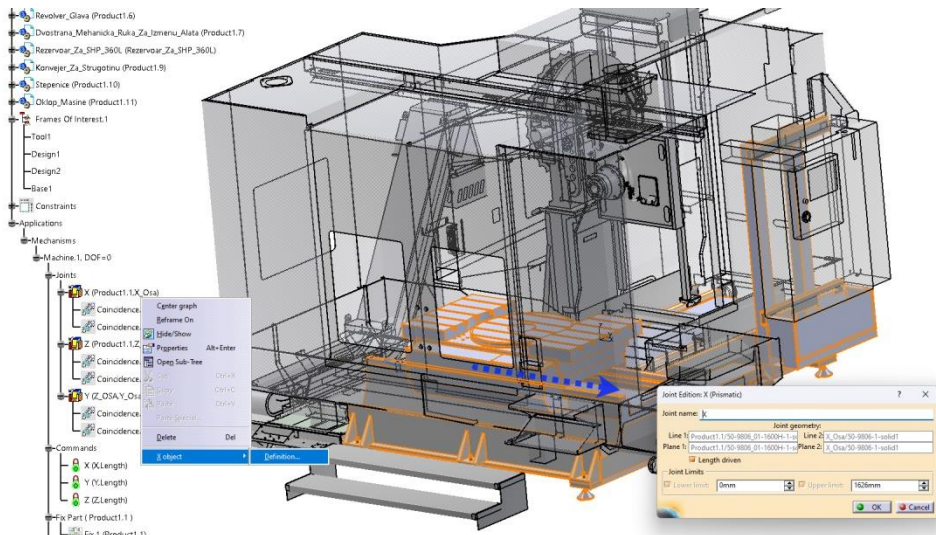
Наравно, анализу недозвољеног задирања је могуће обавити и у овом виду анимације. Потребно је подесити одговарајуће параметре утврђивања колизије који ће зауставити или паузирати спровођење анимације приликом утврђивања задирања, на пример, дела алата без резне ивице у материјал обратка и приказати тачку у којој долази до колизије (Слика 3-217 -а и -б).



**Слика 3-217** Приказ утврђивања колизије алата и обратка приликом анимације резања материјала: (а) *CAM Catia PLM*, (б) *CAM SolidWorks PLM*.

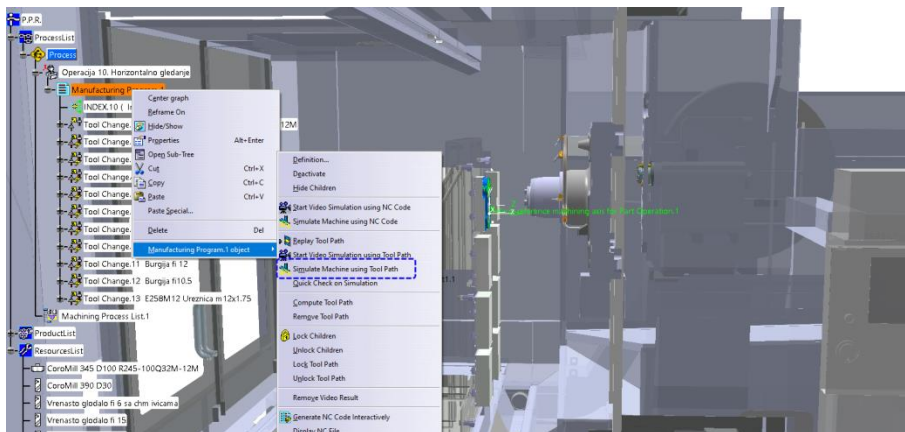
На крају овог кратког поглавља треба поменути још и могућност да се у *CAPP/CAM* апликацијама визуелизује не само алат и производни склоп, већ и читава НУ машина. За такву врсту визуелизације, потребно је најпре формирати машину као кинематски склоп (механизам) у одговарајућој *CAE* апликацији и тек тада, када се одликује одговарајућим

моделима зглобова и слободама кретања, унети у дигитални модел технолошког поступка и придодати јој одлике производног ресурса класе машине и повезати њене извршне подсклопове са припремком.



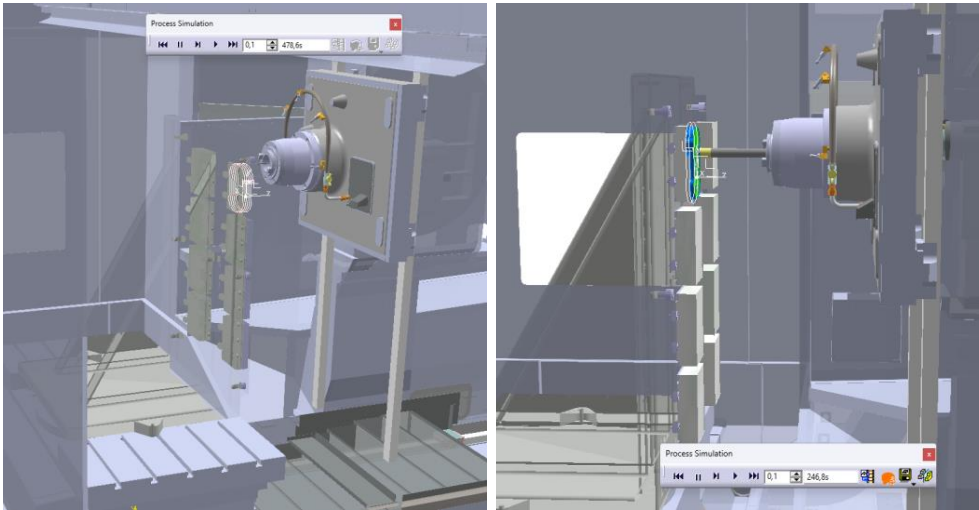
**Слика 3-218** Задавање одлика кинематског склопа (механизма) НУ машине: приказ подешавања дозвољеног релативног кретања модела радног стола и модела постоља у правцу Х осе.

У случају коришћења сложеног систем стезања, када постоји могућност да се симулацијом релативног кретања алата и производног склопа може превидети могућност колизије са деловима машине, овако свеобухватна симулација, која укључује читав простор машине и њених компоненти, има смисла.



**Слика 3-219** Покретање симулације рада машине, односно анимације кретања њених компоненти, алата, стезног прибора и обратка коришћењем низа путања алата у операцији ( CAM модул Catia PLM).





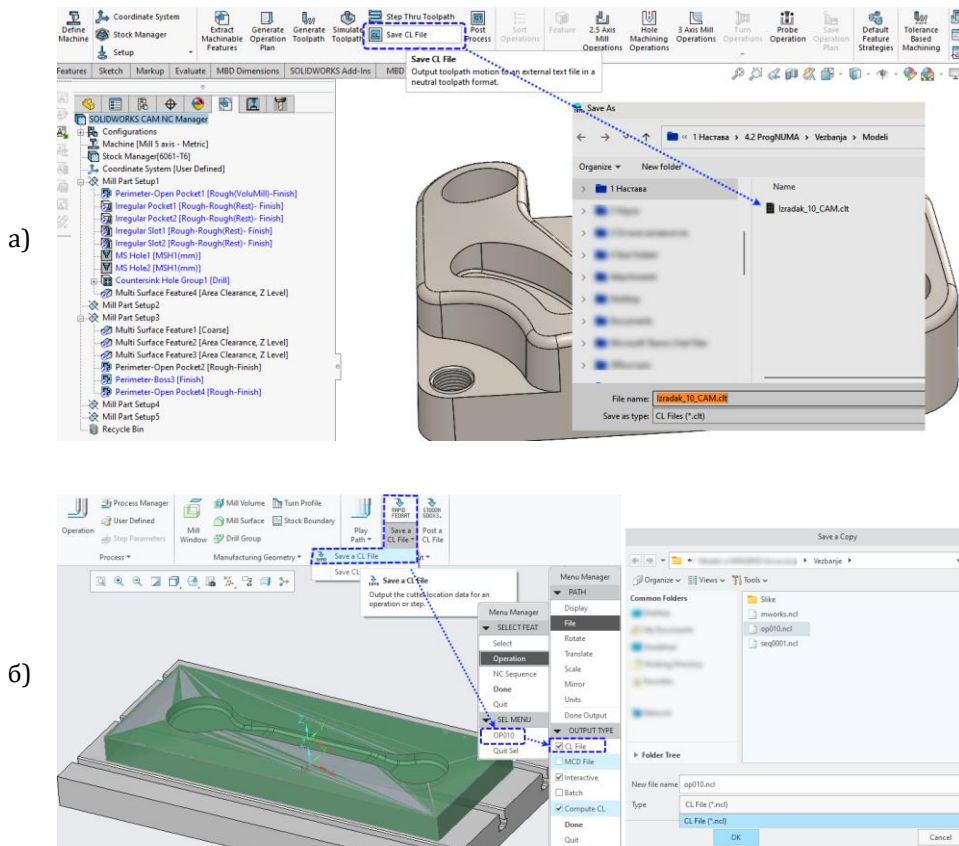
**Слика 3-220** Детаљи из симулације рада машине и анимације комплетне операције глодања низа делова на хоризонталној глодалици.

### 3.4 ИЗРАДА ИЗВРШНОГ ПРОГРАМА И ВЕРИФИКАЦИЈА

У последњој етапи моделирања операција обраде у *CAPP/CAM* апликацији ствара се „извршни“ рачунарски програм којим ће се управљати НУ машином да би се „извршавале“ моделиране обрадне радње. Као што је већ изнето у поглављу 2.2, излазна датотека *CAPP/CAM* апликације је извршни програм записан у АРТ формату (синтакси). У реалној пракси, да би управљачка јединица НУ машине могла исправно интерпретирати, а потом и извршити програмиране радње, неопходно је да се овако записан извршни програм преводи у синтаксу тзв. *G-кода* (ISO 6983 и RS-274).

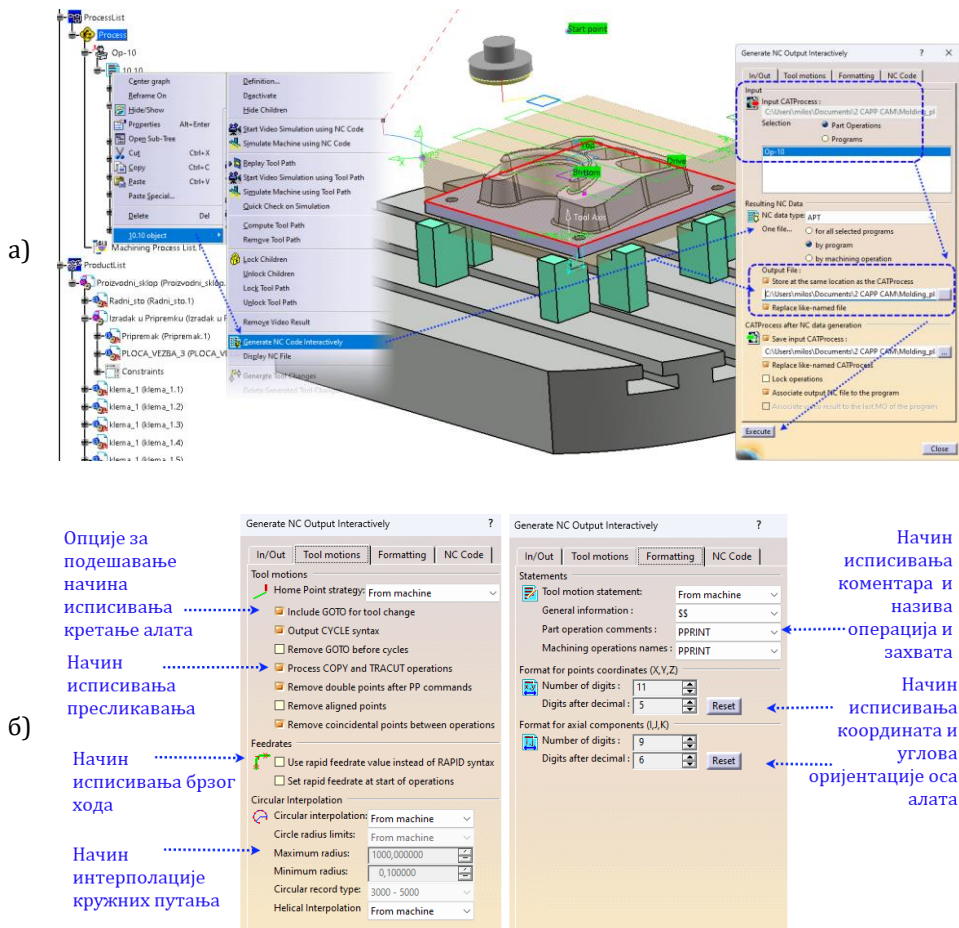
#### 3.4.1 ПОСТУПАК ИЗРАДЕ ИЗВРШНОГ ПРОГРАМСКОГ КОДА

Извршни програмски код се ствара једноставним преводијењем модела операције или захвата са свим неопходним детаљима у АРТ датотеку. То је, дакле, једноставна операција попут трајног записивања (*Save*) било које датотеке на рачунару (Слика 3-221).



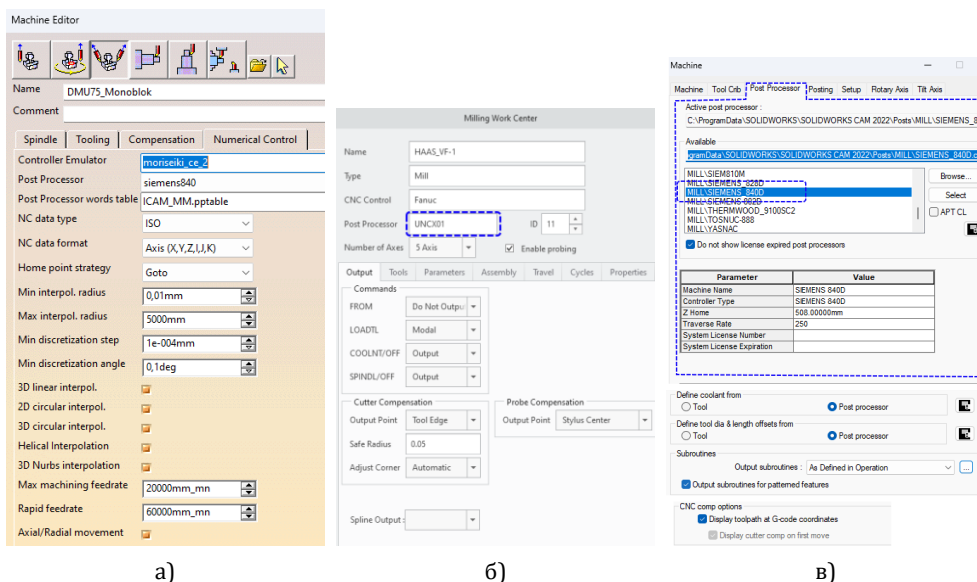
**Слика 3-221** Приказ трајног записивања извршног програма у АРТ формату:  
(а) CAM модул SolidWorks и (б) CAM модул Creo.

Приликом формирања трајног записа извршног програма у АРТ формату, могуће је подесити одређене параметре којима се утврђује начин записивања специфичних одлика путање алата, начин записивања модуларних захвата, тзв. *циклуса*, попут захвата обраде или израде отвора и рупа. Такође, тим параметрима се може подесити начин интерполирања и записивања кривих путања, начин исписивања инструкција за разна пресликавања путање (нпр. копирање), број децимала координата тачака путање и оријентације оса, као и начин исписивања коментара у извршном програму и др. (Слика 3-222).



**Слика 3-222** Приказ поступка стварања и трајног записивања извршног програма моделиране операције (а) уз додатна подешавања начина исписивања појединих детаља програма (б).

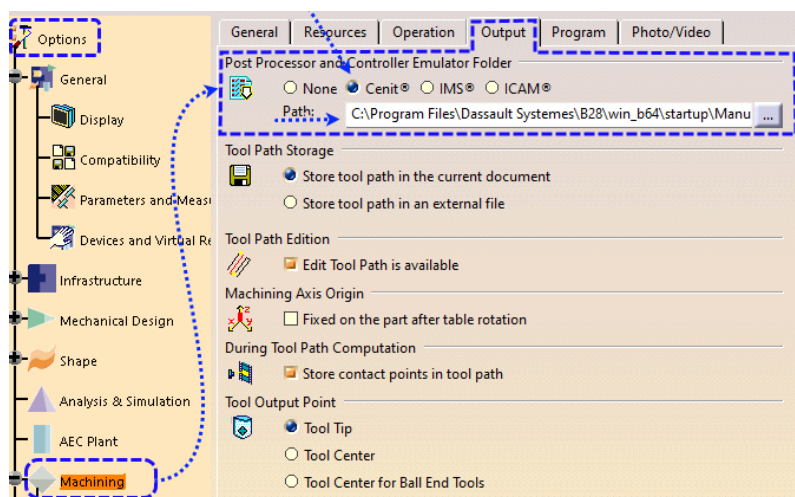
Већину параметара којима се утврђује начин записивања појединих инструкција у извршном програму је могуће подесити и на самом почетку моделирања операције обраде, приликом утврђивања одлика машине. У свим *CAPP/CAM* апликацијама, подешавање параметара исписивања извршног програма у АРТ формату, укључујући и инструкције за превођење (постпроцесирање) АРТ датотеке у ISO6983 формат, тј. у G-кôд, обично је повезано са подешавањем одлика машине и нумеричке контроле (Слика 3-223).



**Слика 3-223** Подешавање одлика нумеричке контроле машине и избор постпроцесора као део поступка подешавања одлика машине.

(а) CAM модуль Catia, (б) CAM модуль Creo, (в) CAM модуль SolidWorks.

Приликом инсталације *CAPP/CAM* софтвера обично је потребно по-  
десити „путање” до рачунарског директоријума (фолдера) где се налази  
један или више *постпроцесора*. (Слика 3-224)

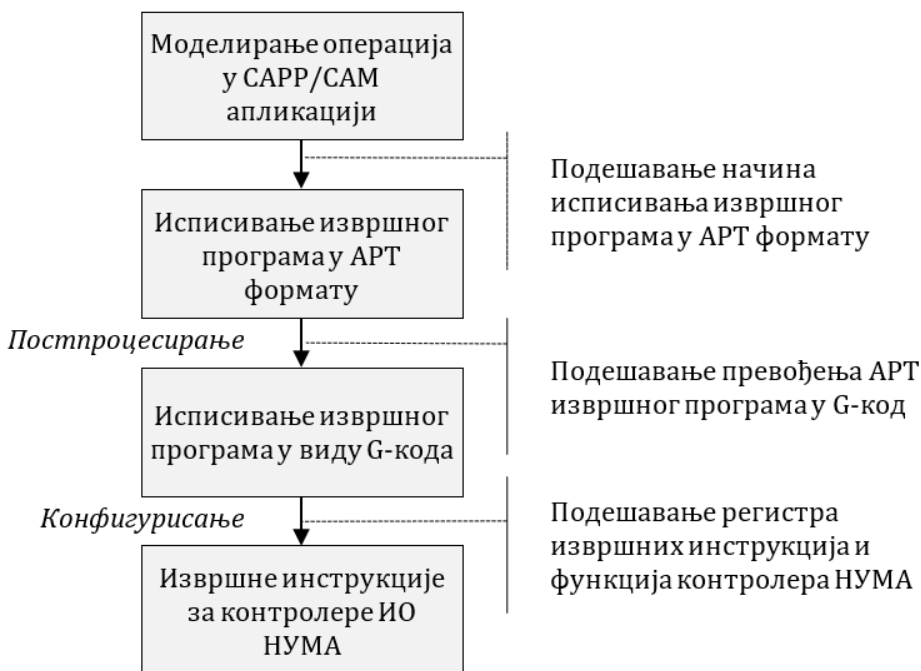


**Слика 3-224** Приказ подешавања путање до збирке постпроцесора у *CAM* модулу Catia PLM софтвера.

Подсетимо се да је често потребно извршити детаљно подешавање *речника са инструкцијама превођења* или тзв. речник постпроцесорских

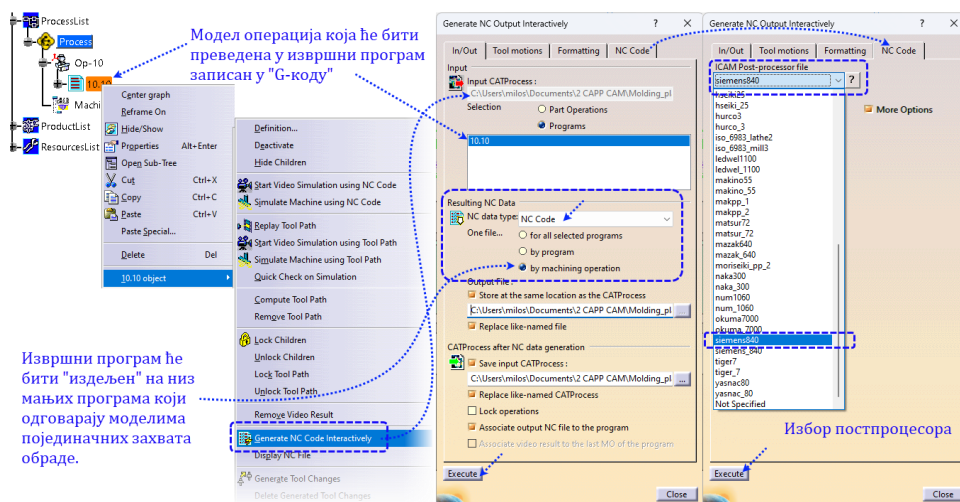
директива, као и низ других опција програмског модула за превођење (*постпроцесора*), како би извршни програм, записан у АРТ формату, могао бити преведен у G-код на исправан начин. То је и разлог због којег произвођачи *CAPP/CAM* софтвера у својим иницијалним инсталацијама нуде тзв. *генеричке* постпроцесоре. *Генерички постпроцесори* су обично подешени за неку од основних комбинација: {варијанта НУМА; варијанта УЈ; варијанта софтвера на УЈ}. Ако у погону не постоји баш та комбинација, потребно је извршити накнадно подешавање пост-процесора. Ипак, у том случају, велики број параметара који су већ подешени у генеричком постпроцесору је могуће искористити и тиме знатно умањити напор.

У последњем кораку превођења (Слика 3-225), полазећи од модела технолошке поступка/операције/захвата до извршних инструкција за контролере НУМА постоји још један ниво интерпретације команди извршног програма. Ради се о интерпретацији команди извршног програма (датог у G-коду) у извршне инструкције за тзв. контролере извршних органа НУ машине. Овај корак је обично обављају инжењери који врше сервис НУМА и који су посебно обучавани и овлашћени за тзв. *пуштање у рад* НУМА (*CNC machine tool commissioning*), односно за подешавање и тестирање конфигурационих параметара машине.

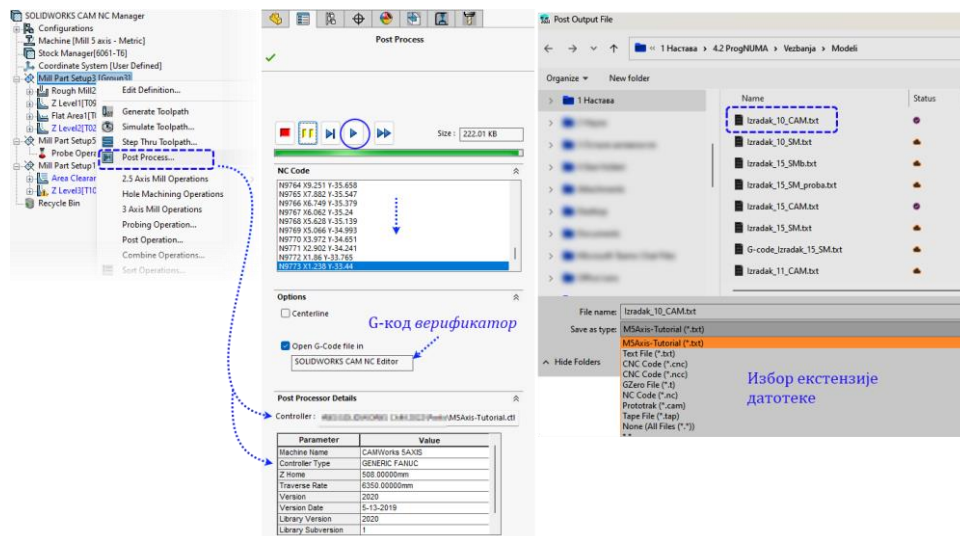


**Слика 3-225** Низ корака превођења од дигиталног модела операције до кретања извршних органа НУМА.

Поступак покретања превођења, односно „позивање“ пост-процесора разликује се између различитих *CAPP/CAM* апликација, али је, ипак, општи приступ веома сличан: 1) потребно је изабрати пост-процесор који ће се користити и, ако је могуће и потребно, подесити поједине параметре исписивања команди и 2) изабрати место на рачунару где ће се датотека - извршни програм трајно забележити (сачувати) (Слика 3-226, Слика 3-227 и Слика 3-228).



Слика 3-226 Приказ покретања превођења записа моделиране операције у извршни G-код. (CAM модул Catia PLM софтвер).



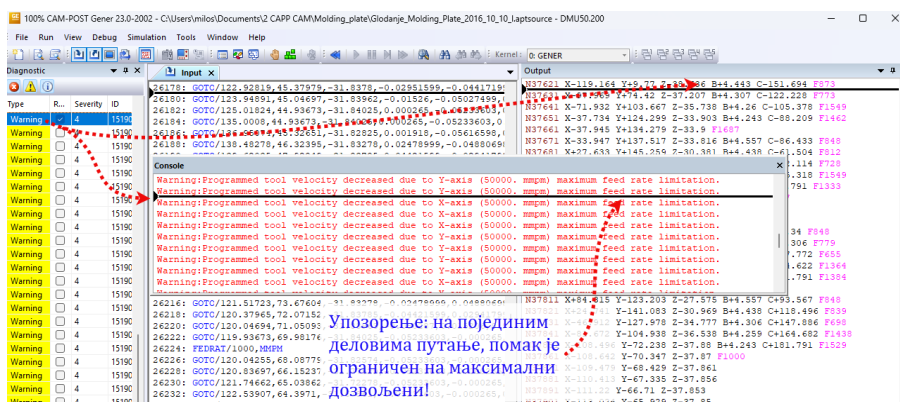
Слика 3-227 Приказ покретања превођења записа моделиране операције у извршни G-код. (CAM модул SolidWorks PLM софтвер).







ти извршавање програма, али упозорења на њих помажу инжењеру да уочи и, уколико је потребно, отклони разлоге њиховог настанка. Слика 3-230 приказује успешно завршено постпроцесирање (без пријављене грешке), али које је пријавило већи број упозорења. На појединим деоницама путање алата дошло је до прекорачења експлицитно наведене максималне дозвољене вредности за помак због чега је постпроцесор морао да, уместо срачунате, примени ту максималну дозвољену вредност. Та информација може да послужи инжењеру да покуша поједине одлике захвата подесити тако да до тог превазилажења ограничења у вредности помака не долази.



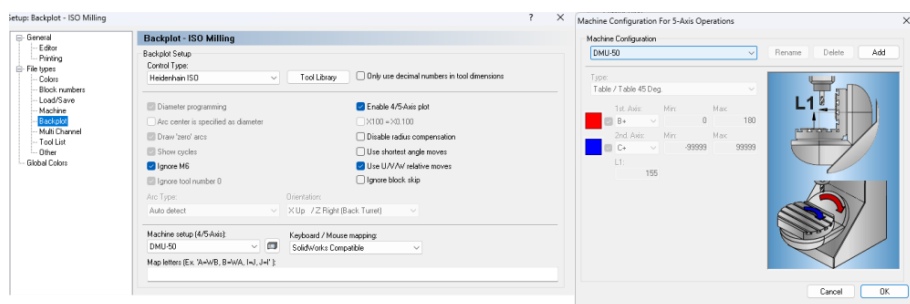
Слика 3-230 Пријаве упозорења од стране постпроцесора у току превођења.

Након свих исправки које се могу обавити у *CAPP/CAM* апликацији или директно у постпроцесору, или чак и у обичној апликацији за уређивање текста попут *Notepad*-а, обично је потребно симулирати израђени G-код (не више извршни програм записан у APT формату). Симулација операција и захвата обраде на основу интерпретације добијеног G-кода помаже да се уоче грешке у преводу или и у самом подешавању начина исписивања извршног програма у APT формату. Овај корак се зове верификација извршног кода и за ту сврху користе се посебне рачунарске апликације, тзв. *CAM* верификатори.

### 3.4.1.1 Верификација извршног кода

Верификација или потврда ваљаности постпроцесирања датотеке из APT у ISO6983 формат се може обавити у *CAM* верификаторима. О њима је било речи на крају поглавља 2.2. Нажалост, за ово издање уџбеника нисмо успели да добијемо приступ одговарајућим *CAM* верификаторима попут CG Tech Vericut, који би нам омогућили да у симулацији искористимо одговарајући модел машине и тиме је учинимо још ефектнијом. Ипак, ради приказа начина коришћења верификатора, за ово издање је

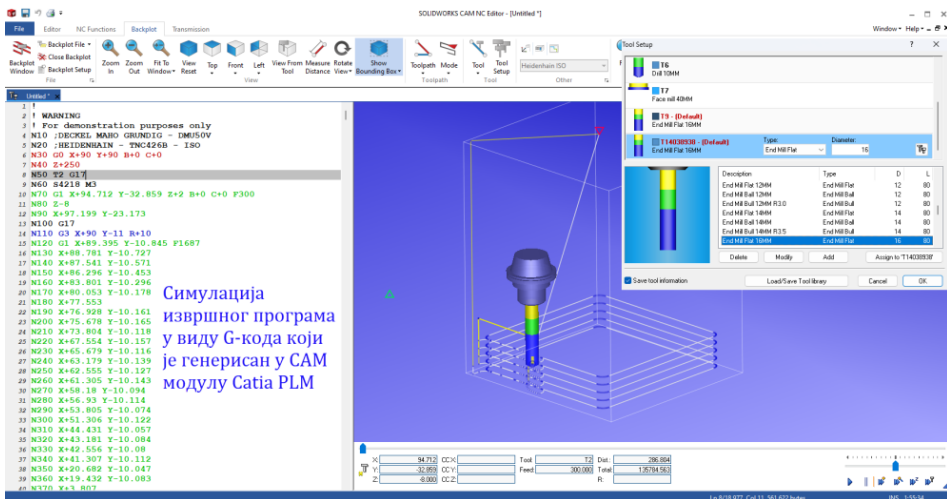
искоришћен SolidWorks CAM NC Editor као CAM верификатор у који се „унесе” G-код створен у CAM модулу Catia PLM софтвера на основу постпроцесирања модела операције. На овом месту је, неопходно, истаћи да исправна симулација спровођења обрадних радњи на основу извршног програма датог у форми G-кода, захтева да се верификатор подеси управо онако како је конфигурисана и сама машина за коју се жели провера ваљаности G-кода. Заправо, то значи да CAM верификатор мора имати у својој збирци модела машина управо онај модел или комбинацију варијанте НУМА опремљене одговарајућом варијантом УЈ на којој је инсталирана одговарајућа варијанта софтвера УЈ који се има у стварности и да, при томе, конфигурација регистра извршних инструкција и функција контролера НУМА буде подешена на одговарајући начин у CAM верификатору. За ову прилику, међутим, ради демонстрације анимације кретања алата, али не и анимације уклањања материјала, нити делова машине, биће приказан пример на сликама Слика 3-231 и Слика 3-232. Да бисмо могли веродостојно да емулирамо<sup>24</sup> спровођење обрадних ради према добијеном и учитаном G-коду, потребно је да се изврши подешавање CAM верификатора. У SolidWorks CAM NC Editor-у, који служи за неку врсту „осиромашене” верификације G-кода, учитан је G-код, а потом су подешени одговарајући параметри за машину и управљачку јединицу (Слика 3-231).



**Слика 3-231** Подешавање одлика машине и управљачке јединице које ће бити коришћене у емулацији програмираних захвата обраде.

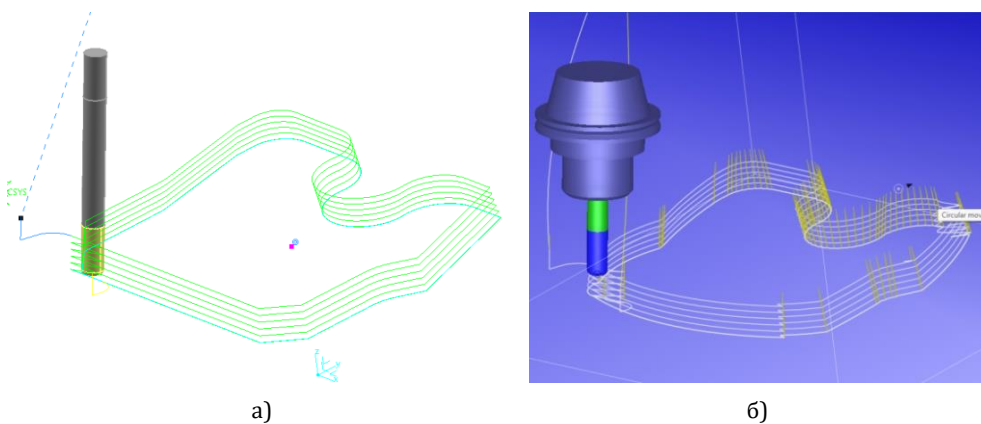
<sup>24</sup> У емулацији се опонашају све хардверске карактеристике НУМА, укључујући и одговарајући комплекс софтвера и фирмвера који се ангажује, што обухвата фирмвер УЈ НУМА и апликативни софтвер инсталиран на њој. Да би се то постигло, обично је неопходно да се користи „емулатор”, што је у нашем случају CAM верификатор који користи потпуно исти комплекс софтвера и фирмвера. Емулатори су најкориснији када треба тестирати како софтвер интерагује са основним хардвером или комбинацијом хардвера и софтвера. У симулацији се, међутим, не покушава да емулира стварни хардвер који ће „угустити” апликацију у производњи. Пошто симулатори креирају само софтверска окружења, могу се имплементирати помоћу програмског језика високог нивоа.

Такође, у оквиру припреме емулације, подешавају се одлике геометрије алата који ће бити „прозивани“ у извршном програму (Слика 3-232) и након тога се покреће интерпретација извршног програма записаног у виду G-кода.



**Слика 3-232** Приказ осиромашене верификације G-кода који је генерисан управо за подешену машину (DMU50) и одговарајућу управљачку јединицу (Heidenhain) у Catia помоћу генеричког ICAM постпроцесора.

Приликом „верификационе симулације“ могуће је уочити неподударност између геометрија путање алата коју смо анимирали у *CAPP/CAM* апликацији на основу извршног програма у APT формату и путање алата анимирание на основу интерпретације тог истог програма, али записаног у виду G-кода.

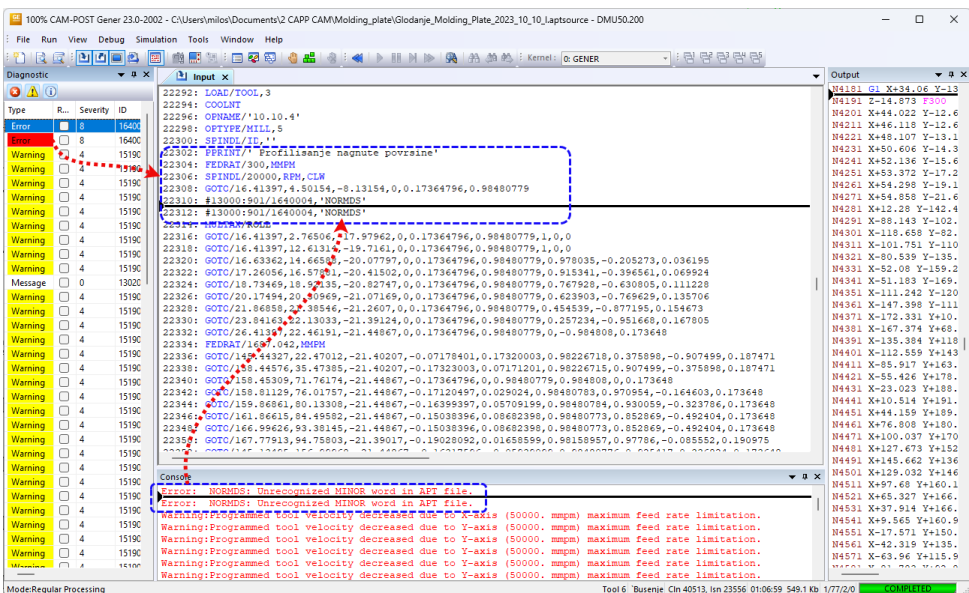


**Слика 3-233** Приказ разлике у путањи алата која је добијена интерпретацијом дела извршног програма датог у APT формату (а) и истог тог дела путање интерпретираног на основу G-кода (б).

Уочена неподударност путање алата исцртане на основу АРТ и на основу G-кода може настати из два разлога:

1. неодговарајућег превођења (постпроцесирања) услед лоше подешеног постпроцесора или/и
2. неодговарајуће интерпретације G-кода у случају да је подешавање CAM верификатора изведено неадекватно.

У *debug*-еру се јасно може уочити да је вођење алата на деловима путање, на којима се алат креће по правим линијама, али са одговарајућим бочним нагибом, лоше „преведено“ (Слика 3-233). Преводјење у G-код није било успешно, јер одређена команда није препозната од стране постпроцесора и самим тим, није ни интерпретирана исправно (Слика 3-234). Неадекватна интерпретација тзв. секундарне инструкције АРТ синтаксе (*minor word*), којом је дат опис кретања алата на тим деловима путање, односно, конкретно, начин генерисања нагиба осе алата у тачкама путање између крајњих тачака праволинијских елемената путање. Остаје могућност да се, у овом случају, побољшају подешавања постпроцесора или да се подеси начин исписивања сложених кретања у АРТ формату, који ће бити читљив постпроцесору, односно којим ће се избећи коришћење секундарне инструкције која се не налази у речнику постпроцесорских директива.

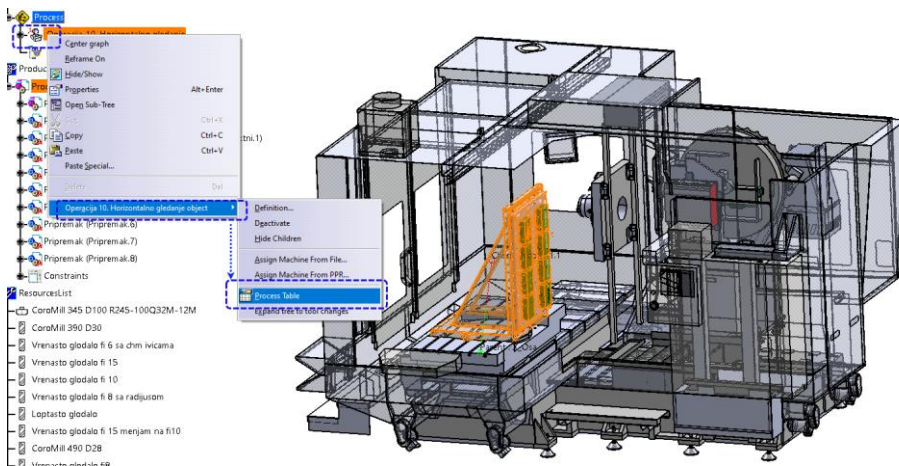


Слика 3-234 Постпроцесор не препознаје инструкцију из извршног програма записаног у АРТ формату.

Уколико је узрок у неадекватном подешавању *CAM* верификатора, односно да апликативни софтвер и/или фирмвер УЈ није у стању да спроведе поменућу инструкцију, најчешће се прибегава појединостављењу записа сложених кретања у АРТ формату. Алтернативно, потребно је да се измени речник постпроцесорских инструкција који чита УЈ и регистар појединих параметара којим се контролише начин управљања НУМА (да се изврши тзв. *update* софтвера и фирмвера УЈ).

### **3.4.2 ИЗРАДА ЛИСТЕ ОПЕРАЦИЈА И ЗАХВАТА (*PROCESS TABLE*)**

На крају поглавља о моделирању операција обраде резањем, треба рећи да *CAPP/CAM* апликације омогућавају аутоматско стварање дигиталне документације која описује моделирани поступак обраде са свим битним детаљима. Заправо, ради се о некој врсти операционих листа које се нешто другачије представљају од конвенционалних. Поступак формирања дигиталне технолошке документације о моделираном поступку обраде се одвија у пар корака. С обзиром да *CAPP/CAM* апликација у себи већ садржи све податке о сваком захвату у операцији или низу операција на основу дигиталног модела технолошког поступка, довољно је да се активира алат за формирање „процесне документације” и да се изабере место где ће се трајно забележити низ докумената, најчешће записаних у HTML формату. HTML формат допушта једноставан преглед на свакој рачунарској опреми уз помоћ Интернет претраживача. Наравно, могуће је превести ове документе у штампану форму, али се у савременим индустријским окружењима тежи да сва документације буде чувана преваходно у дигиталној форми. Такође, могуће је искористити и друге посебне софтвере који су намењени за приказ техничких докумената и производних инструкција, попут Lattice3D, уколико се документација жели учинити још садржајнијом и интуитивнијом. Оно што је посебно важно у вези са овим „излазом” из *CAPP/CAM* апликација јесте да се он може искористити за планирање материјалних ресурса производног погона и одвијања производње у времену. Технолошка документација се може добити у два формата. Први формат је прикладан за употребу у интегрисаним софтверским решењима за управљање подацима о производу и технологији тзв. *PDM* системима. Ради се о табеларној форми која је погодна за комуникацију са системима за управљање базама података.



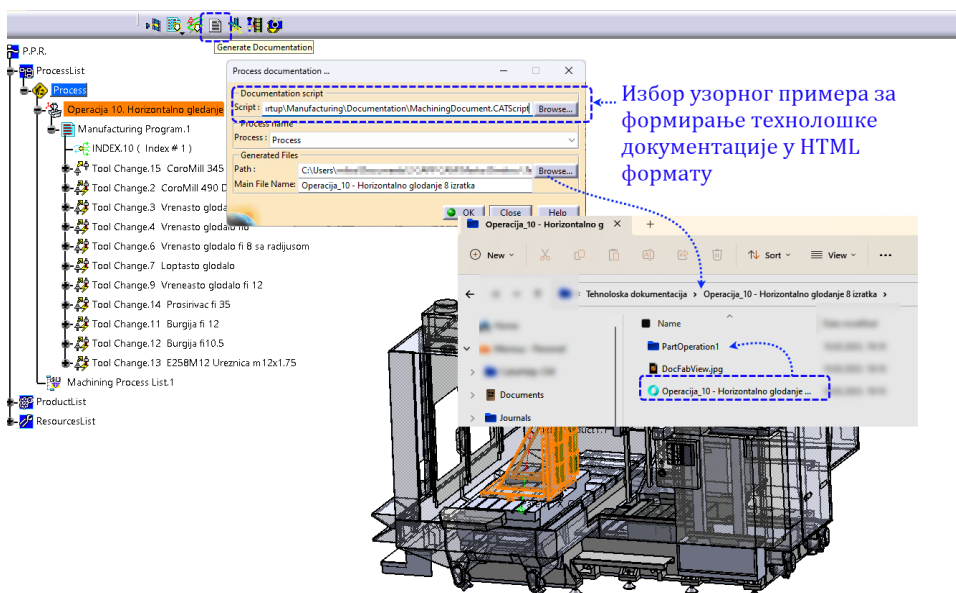
Слика 3-235 „Позивање” алата за израду тзв. дигиталне операционе листе у табеларној форми.

Number	Name	Type	Machining feedrate	Spindle speed	R...	Resource name	Ca...	Status	Locked	Completed	Pa...	Vol...	Spec...	Start time	Machining time	Machining int...	Refined feedrate	Approach f...	Tool/Insert name
1	Process 10: Horizontalno glodanje	Process	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Process 10: Horizontalno glodanje	Process	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Tool Change 10	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Tool Change 11	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Zahvat 1: Glodanje osovine glodalice	Facing	380,75mm/min	880,00rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Tool Change 2	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Zahvat 2: Glodanje osovine glodalice	Profile Contouring	1296,452mm/min	2987,210rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Tool Change 3	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Zahvat 3: Glodanje završetka materijala	Profile Contouring	1514,343mm/min	10230,960rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	Tool Change 4	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Zahvat 4: Glodanje profilnog otvora	Prismatic roughing	1778,756mm/min	7440,480rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Tool Change 5	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	Zahvat 5: Fino brušenje osovine	Profile Contouring	879,299mm/min	3312,830rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Tool Change 6	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Zahvat 6: Glodanje završetka materijala u osovini i os...	Prismatic	9031,65mm/min	19205,690rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Tool Change 7	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Zahvat 7: Glodanje radijusa R10	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	Tool Change 8	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	Zahvat 8: Glodanje radijusa R2	Advanced Finishing	2548,470mm/min	15915,480rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Tool Change 9	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	Zahvat 9: Fino brušenje osovine	Profile Contouring	1415,940mm/min	4500,380rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	Tool Change 10	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	Zahvat 10: Glodanje osovine glodalice krunog di...	Facing	1415,940mm/min	4500,380rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	Tool Change 11	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	Zahvat 11: Glodanje osovine glodalice krunog di...	Facing	1415,940mm/min	4500,380rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	Tool Change 12	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	Zahvat 12: Postištavanje osovine f15	Boring	1299,870mm/min	1727,960rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Tool Change 13	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	Zahvat 13: Brušenje osovine f15	Boring	1392,600mm/min	2785,212rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	Tool Change 14	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	Zahvat 14: Brušenje osovine f10,5	Boring	1481,050mm/min	3218,410rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	Tool Change 15	Tool Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	Zahvat 15: Glodanje vanjske M2x1,5	Tapping	802,14mm/min	802,14rpm/min Angular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

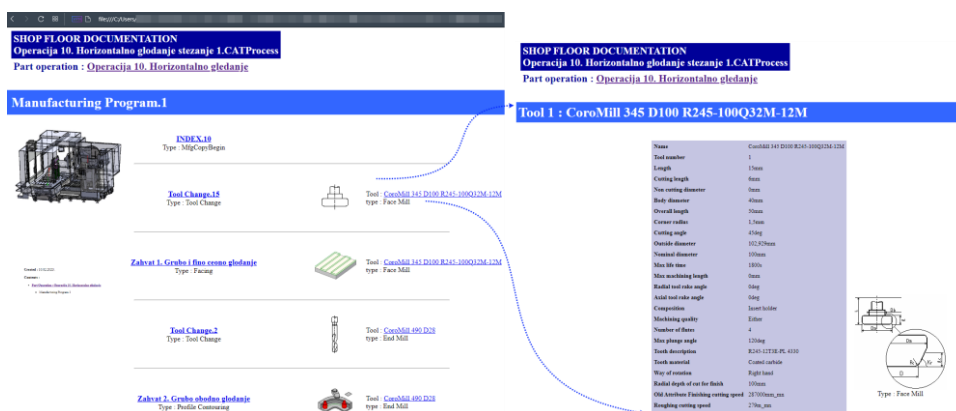
Слика 3-236 Приказ операционе листе са детаљима сваког захвата укључујући и главни и укупна времена трајања захвата.

Други формат је прикладнији инжењерима и оператерима за преглед. Ради се о технолошкој документацији и операционим листама записаним у HTML формату. Покретање поступка аутоматизоване израде оба облика документације у CAM модулу Catia PLM софтвера су приказани на сликама (Слика 3-235 до Слика 3-238).





**Слика 3-237** Покретање поступка израде технолошке документације у форми колекције HTML страница.



**Слика 3-238** Приказ дела формиране технолошке документације са детаљима захвата у колекцији повезаних HTML страница.



## ЛИТЕРАТУРА

- Dassault Systemes. (2009). CATIA Version 5 Release 19 - Multi-Slide Lathe Machining. [http://yvonet.florent.free.fr/SERVEUR/COURS%20CATIA/CATIA%20Machining/MLG\\_F/Teacher/EDU\\_CAT\\_EN\\_MLG\\_FI\\_V5R19\\_toprint.pdf](http://yvonet.florent.free.fr/SERVEUR/COURS%20CATIA/CATIA%20Machining/MLG_F/Teacher/EDU_CAT_EN_MLG_FI_V5R19_toprint.pdf)
- Dassault Systemes. (2018). CATIA - NC Manufacturing.
- Dassault Systemes. (2018). CATIA Version 5-6 Release 2018 Documentation.
- Dotchev K., Popov, I. (2021). *CAD/CAM with Creo Parametric*, <https://doi.org/10.1142/q0274>, ISBN: 978-1-78634-935-4 (ebook)
- Kief, H. B., Roschiwal, H. A. and Schwarz K. (2022) *The CNC Handbook, Digital Manufacturing and Automation from CNC to Industry 4.0*, Industrial Press inc. ISBN (ePUB) 978-0-8311-9498-7
- Ogrizović, M., (2007). *Upravljanje CNC mašinama iz ProEngineer-a Wildfire* (1. izdanje), Kompiuter biblioteka. ISBN 978-86-7310-402-7
- Sandvik Coromant. (2017). *Metal Cutting Technology Training Handbook*. <https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/download?url=https%3A%2F%2Fcdn.sandvik.coromant.com%2Fpublications%2Fa9d341b5-16cc-4f7c-8e60-2f927ea651fa.pdf&fileName=C-2920-40.pdf>
- Sandvik Coromant. (2023). <https://www.sandvik.coromant.com>
- Smid, P. (2007). *CNC Programming Handbook: Comprehensive guide to practical CNC programming* (3<sup>rd</sup> ed.). Industrial Press Inc. ISBN 0-8311-3158-6
- SolidWorks 2019 Documentation, <https://my.solidworks.com/training/path/80/solidworks-cam>
- Stojković, M.; Madić, M.; Trifunović, M.; Turudija, R. (2022). Determining the Optimal Cutting Parameters for Required Productivity for the Case of Rough External Turning of AISI 1045 Steel with Minimal Energy Consumption. *Metals*, 12, 1793. <https://doi.org/10.3390/met12111793>
- Trifunović, M., Madić, M., & Radovanović, M. (2020). Pareto optimization of multi-pass turning of grey cast iron with practical constraints using a deterministic approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7-8), 1893-1909. DOI: 10.1007/s00170-020-05994-4
- Trifunović, M., Madić, M., Marinković, D., & Marinković, V. (2023). Cutting Parameters Optimization for Minimal Total Operation Time in Turning POM-C Cylindrical Stocks into Parts with Continuous Profile Using a PCD Cutting Tool. *Metals*, 13(2), Article ID: 359, 19 pages. DOI: 10.3390/met13020359

# 4 МОДЕЛИРАЊЕ ОПЕРАЦИЈА ОБРАДЕ ДЕФОРМИСАЊЕМ

---

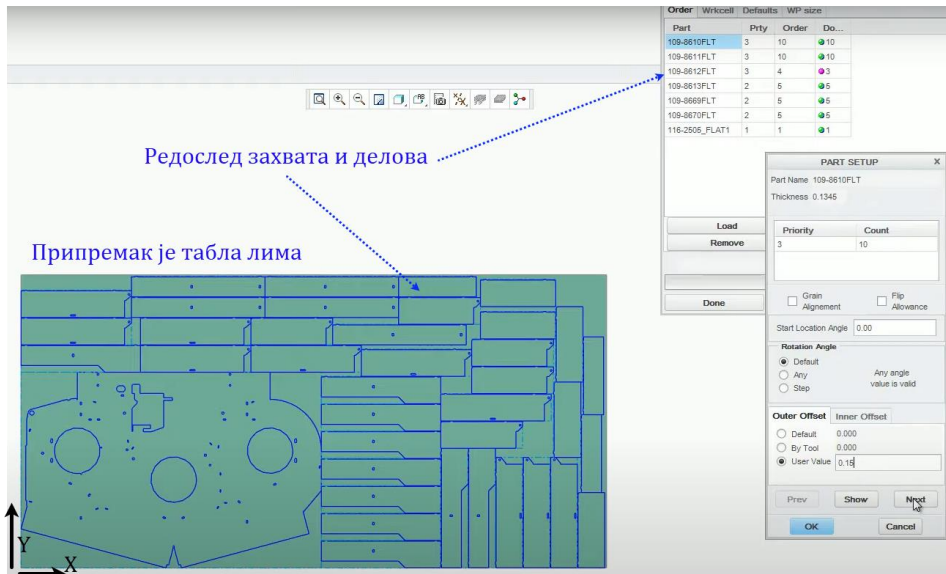
- 4.1 Операција пробијања и просецања
  - 4.2 Операције савијања
  - 4.3 Операције спајања лимова пластичном деформацијом
  - 4.4 Операције дубоког извлачења
    - 4.4.1 Дубоко извлачење са стањењем дебљине зида
  - 4.5 Операције финог пробијања и просецања
  - 4.6 Операције ковања
    - 4.6.1 Топло ковање у отвореним алатима
    - 4.6.2 Топло ковање у затвореним алатима
    - 4.6.3 Ротационо ковање
    - 4.6.4 Хладно ковање у затвореном алату
- Литература



У овом поглављу ће бити укратко представљене операције обраде деформисања које се моделирају помоћу *CAE/CAM* рачунарских апликација. За разлику од поглавља у коме су приказане операције обраде резањем, овде се неће тако детаљно објашњавати поступак моделирања операција деформисања, јер је томе много више материјала посвећено у оквиру других предмета који су окренути технологији пластичног деформисања. Моделирање поступака обраде материјала пластичним деформисањем помоћу рачунарских апликација се може, према начину анализе и симулације, разврстати у две групе:

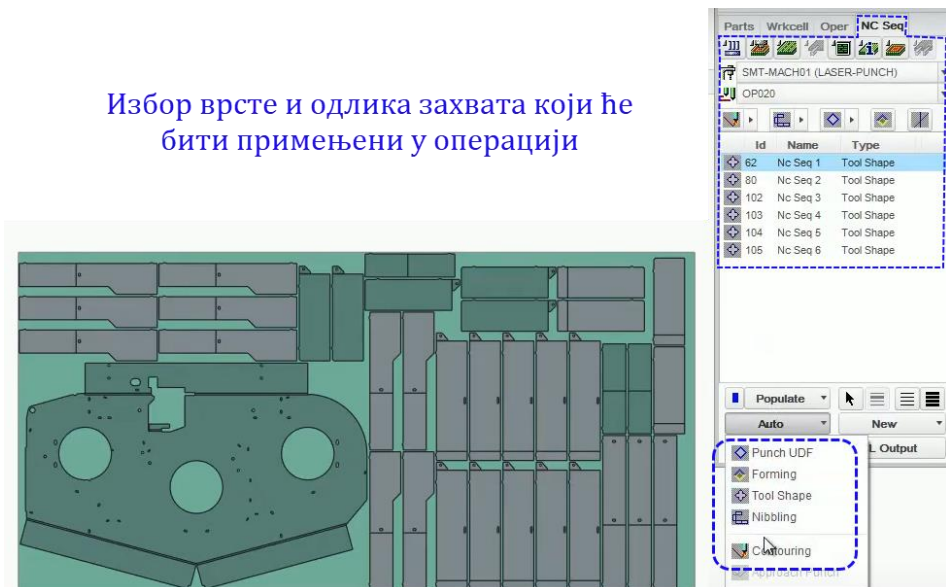
1. моделирање поступака обраде пластичним деформисањем који не захтевају нумеричку анализу и симулацију самог процеса деформисања и
2. моделирање поступака обраде пластичним деформисањем који захтевају нумеричку анализу и симулацију самог процеса деформисања.

У прву групу спадају операције пробијања и просецања, савијања и спајања лимова, док у другу групу спадају дубоко извлачење и ковање. Моделирање прве групе операција је могуће наћи у уобичајеним *CAPP/CAM* апликацијама. Такође, битно је уочити да су ови *CAPP/CAM* модули обично непосредно повезани са посебним *CAD* модулима (*Sheetmetal part design*) којима се моделира геометрија делова који се добијају на овај начин. Моделирање операција и захвата пробијања, просецања и савијања се одвија на веома сличан начин као и код моделирања операција обраде резања контурног сечења. Наравно, постоје специфичности у погледу одређивања обрадне геометрије, припремка, стезног алата, машине и обрадних алата. Ипак, на крају, излаз из моделирања ових операција је извршни програм, записан најчешће у АРТ формату. НУ машине које обављају ове операције (пресе- пробијачице и савијачице) могу да користе непосредно АРТ формат или одговарајућу варијанту G-кôда. Симулација обраде са анимацијом кретања припремка/обратка и са приказом уклањања или деформисања материјала је иста као и код операција и захвата обраде резањем (Слика 4-1 - Слика 4-4). Приликом моделирања ових операција и захвата деформисања, нумеричка анализа процеса деформисања није од пресудне важности, већ је најважније добити исправан извршни програм којим ће се управљати радом НУ машине.



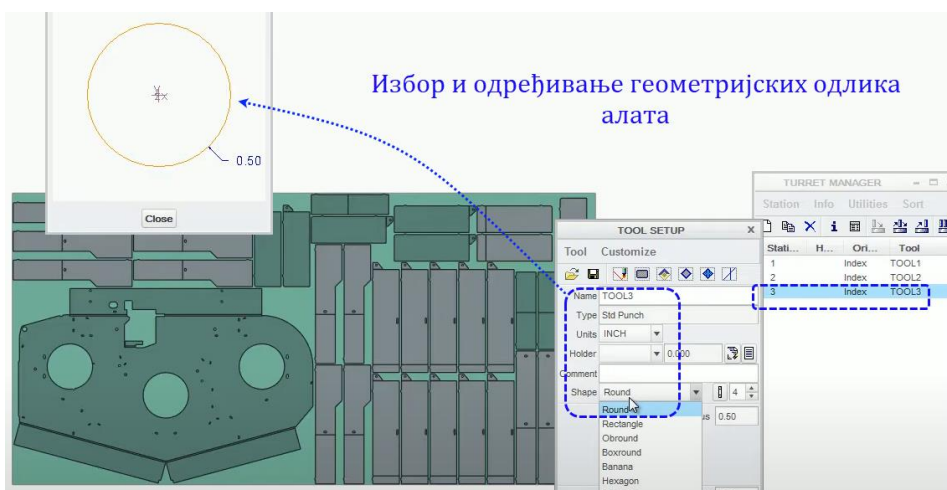
**Слика 4-1** Подешавање припремак и делова који ће произићи из операције просецања пластичном деформацијом и контурног исецања ласером.<sup>1</sup>

Избор врсте и одлика захвата који ће бити примењени у операцији

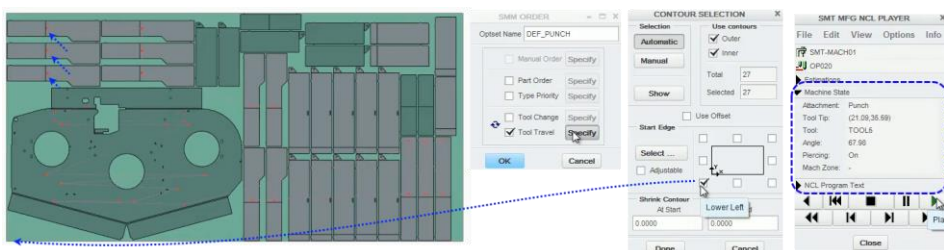


**Слика 4-2** Корак у коме се дефинишу врсте захвата потребни за просецање и пробијање облика на припремку.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Преузето са InvensysCAD Solutions/NC SheetMetal in PTC Creo.



Слика 4-3 Подешавање одлика алата за сваки захват.<sup>2</sup>



Слика 4-4 Избор контура за просецање и симулација обављања захвата.<sup>3</sup>

Код дубоког извлачења, ковања и истискивања, за исправно моделирање операција најважније је обавити ваљану нумеричку анализу и симулацију самог процеса деформисања јер се ради о процесима код којих није извесно какав ће бити резултат обраде. Према томе, веома је важно да се обави нумеричка анализа и симулација деформисања материјала, која треба да пружи што реалнији приказ промене стања унутрашње структуре материјала обратка током процеса деформисања, затим степен деформације и унутрашње напоне у структури и тзв. линије течења материјала. Из тог разлога, моделирање ових операција се одвија уз помоћ посебне врсте софтвера који обично у себи комбинују својства *CAD*, *CAE* и *CAM* рачунарских апликација. У фокусу моделирања ових технолошких поступака је обављање нумеричке анализе пластичног деформисања применом методе коначних елемената (*MKE* или *Finite*

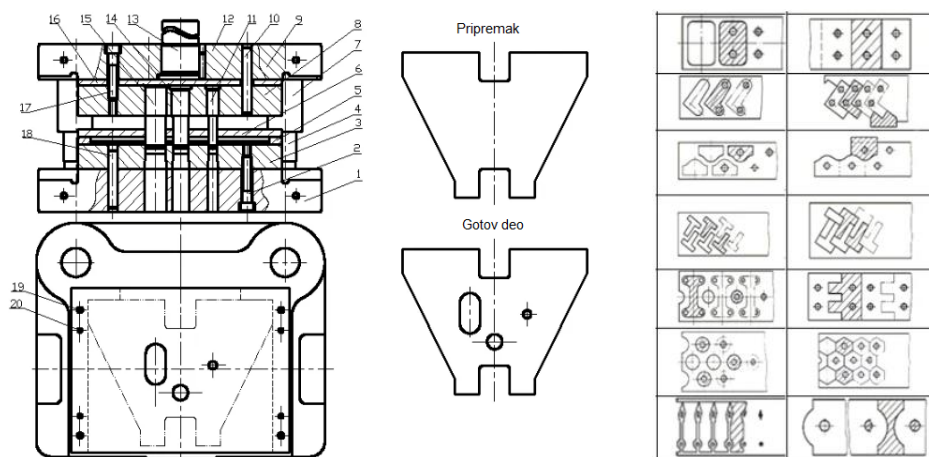
<sup>2</sup> Преузето са InvensysCAD Solutions/NC SheetMetal in PTC Creo

<sup>3</sup> Преузето са InvensysCAD Solutions/NC SheetMetal in PTC Creo

*Element Method -FEM*). „Излаз” из оваквих модела обрадних процеса је одговарајућа конструкција и облик алата и калупне шупљине, затим редослед операција и захвата и одлике деформационе силе у тим операцијама. Битно је уочити да, у овом случају, резултат моделираног процеса обраде није извршни програм НУ машине (мада један део резултата моделирања процеса може бити и извршни програм, уколико се ради о високо продуктивним НУ пресема којима се треба контро-лисати редослед одвијања захвата и операција).

## 4.1 ОПЕРАЦИЈА ПРОБИЈАЊА И ПРОСЕЦАЊА

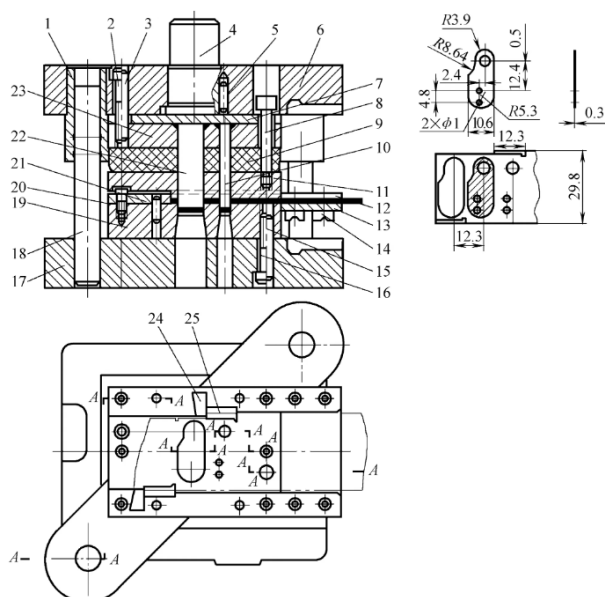
Операције пробијања и просецања су веома честе у обради лима како у појединачној, тако и серијској и масовној производњи. Полазећи од врло једноставних до сложених контура, модел се разликује у толико какав је финални захтев постављен. Уколико се ради са о појединачним елементима, онда се само пробијају отвори различитих облика и величина (Слика 4-5).



**Слика 4-5** Алат за пробијање отвора и распоред израдака на траци (припремку).

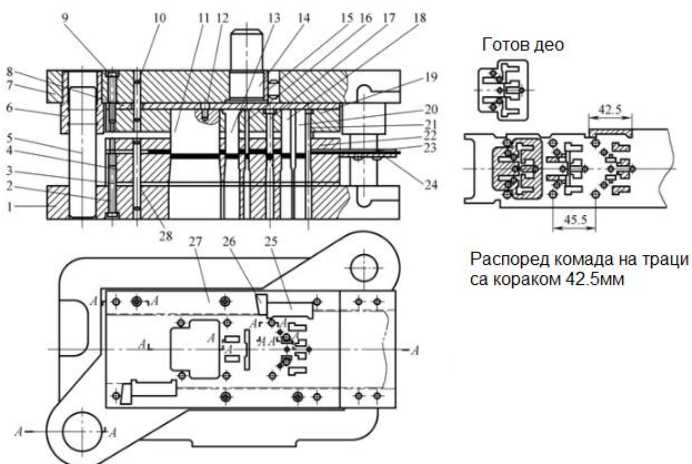
У случају великосеријске и масовне производње, један од најбитнијих задатака је направити оптималан распоред комада на траци који гарантује најмањи утрошак материјала, али и распоред специјалних алата у горњем делу, односно распоред отвора у резној плочи доњег дела алата. Када се све то смести у стандардно кућиште, добија се специјални алат који служи за израду само једне задате контуре на механичкој или хидрауличној преси. Геометријски модел алата предвиђа ограничење корака траке (бочним ножем, граничним чивијама или електронским сензорима), како би имали увек исти помак (Слика 4-6).





**Слика 4-6** Алат за пробијање и просецање отвора.

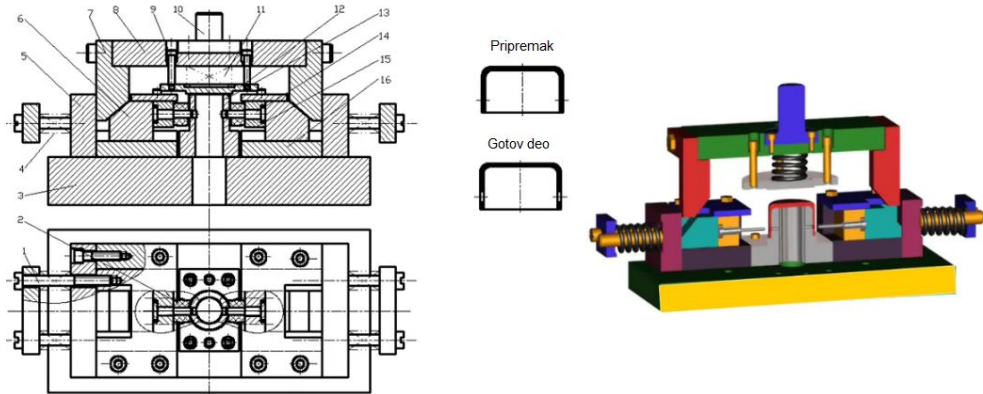
Сложенија контура готовог дела са више правилних или неправилних отвора захтева и сложенији алат. Модел алата је утолико сложе- нији јер захтева већи број узастопних операција пробијања (Слика 4-7), да би у последњим операцијама имали савијање или дубоко извлачење и, на крају, просецање или одсецање готовог дела.



**Слика 4-7** Сложенији алат за пробијање и просецање плочице са отворима.<sup>4</sup>

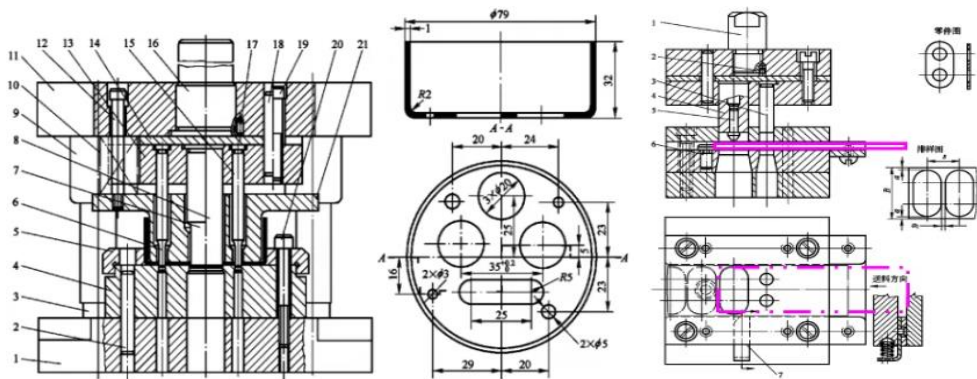
<sup>4</sup> <https://www.machinemfg.com/metal-stamping-and-die-design-blanking/>

Уколико је потребно израдити отворе на бочним странама обликованог (извученог) дела, модел алата подразумева пренос деформационе силе преко косих равни (Слика 4-8). Да не би долазило до заглављивања пробојаца, остварена је еластична веза помоћу опруге. Овакав сложенији модел може да подразумева и дубоко извлачење у једној технолошкој операцији.



Слика 4-8 Алат за бочно пробијање отвора извученог дела.

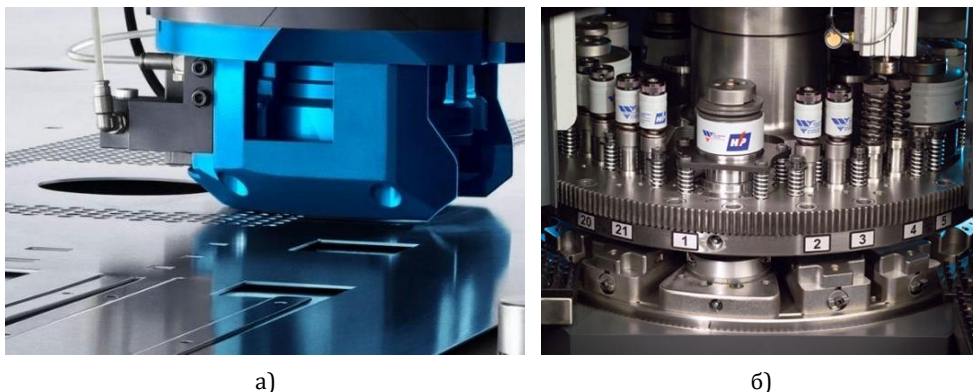
Модел алата који предвиђа пробијање више отвора на дну извученог дела подразумева алат који обезбеђује тачно позиционирање дела (Слика 4-9).



Слика 4-9 Алата за пробијање отвора на дну извученог дела.

Посебну групу машина за пробијање отвора на великим површинама лима чине нумерички управљане пробијачице. Постоје две варијанте ових машина: 1) са покретним, нумерички-управљаним алатима смештеним у специјалном носачу и 2) са покретним, нумерички управљаним радним столом на коме се налази табла лима (припремак). У првом случају, програмски изабран алат се доводи на задату координату

изнад табле лима (Слика 4-10 -а), док се, у другом, табла лима на покретном столу доводи између парова алата који се програмски мењају (Слика 4-10 -б). Неке од предности НУ пробијачица су - могућност економичне производње отвора у табли лима за мале и средње серије, али и релативно приступачне операција сечења све док није потребан специјални алат (Слика 4-10).



**Слика 4-10** Два конструктивна решења пробијачица.

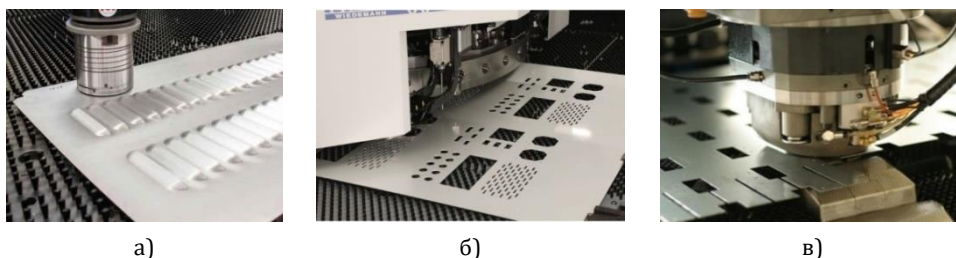
Приликом моделирања операције пробијања, у *SAM* модулу се врши избор и стандардних парова алата (пробојац и матрица) и утврђивање распореда дејства низом вишеструких радних ходова. *SAM* апликација симулира формирање отвора у лиму који је чврсто стегнут на радном столу и који се помера по тачно задатим координатама. Поменути парови алата (Слика 4-11) постављени су у специјализовани покретни носач преко кога се изабрани пар алата доводи у радни положај дејства деформационе силе.



**Слика 4-11** Парови алата на пробијачицама.

Сам процес пробијања лима је веома брз и ефикасан. Бржа израда отвора различитих облика и величина елиминише потребу за секундарним операцијама плитког обликовања. Такође, могуће је вршити обраду различитих материјала лима (челика, алуминијума, бакра, месинга и сл.). Деформациона сила код пробијачица се најчешће обезбеђује уз помоћ

хидрауличног или електричног погона уз нумерички управљан носач алата или координатни сто на који се чврсто везује припремак у облику табле лима (Слика 4-12). Деформациона сила је у опсегу 200 kN до 4500 kN. То су специјализоване алатне машине које раде са врло великим бројем радних ходова, чак и до 1400 min<sup>-1</sup>.

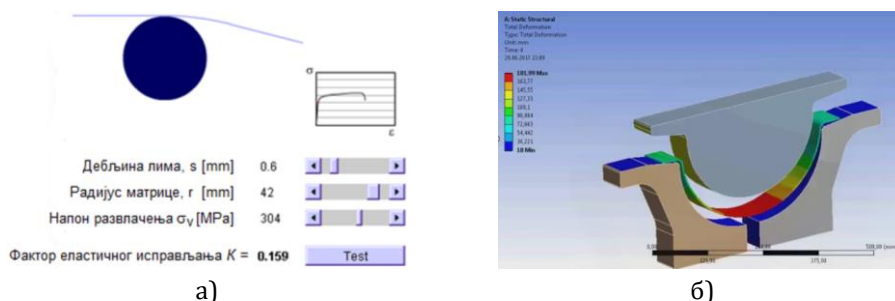


Слика 4-12 Неке од операција на НУ пробијачици<sup>5</sup>.

## 4.2 ОПЕРАЦИЈЕ САВИЈАЊА

Процес савијања у индустријским условима обично захтева сложене CAD/CAE/ CAM моделе (Слика 4-13 -б) како би операције обраде на ефикасан начин формирале геометријски тачан израдак. До изражаја долази тачно одређивање:

- геометрије алата која обухвата дефинисање радијуса и углова,
- еластично исправљање савијеног комада и
- редоследа савијања сложених профила и потребна кретања.



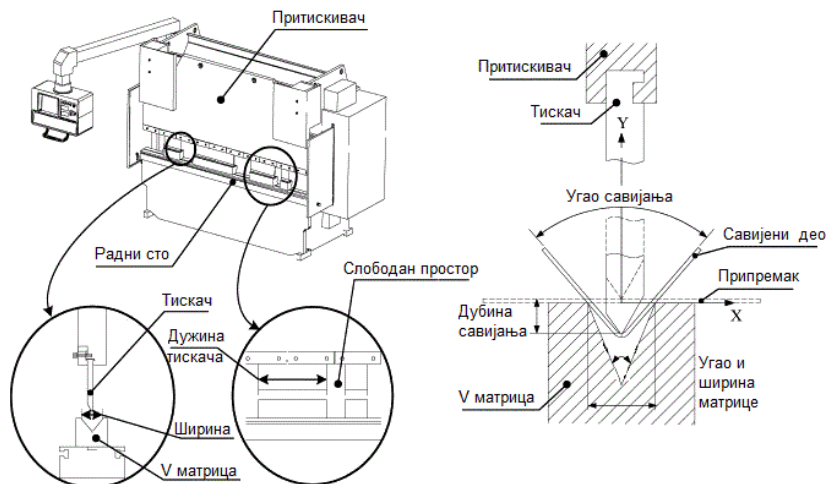
Слика 4-13 Параметри за софтверско дефинисање фактора еластичног исправљања.

Параметри алата који су у непосредном контакту са припремком директно дефинишу тражену геометрију. Ту се, пре свега, мисли на одређивање радијуса и углова тискача и матрице како би се добила тра-

<sup>5</sup> <https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>

жена геометрија готовог дела. Њихова величина је условљена самим материјалом који се савија, односно његовом напонском границом развлачења  $\sigma$ . Том проблему се посвећује велика пажња од појединачних лабораторијских тестова узорака до софтверских симулација, код којих ће тачно бити дефинисана вредност фактора еластичног исправљања  $K$  (Слика 4-13 -а).

Стандардни или специјално пројектован алат смешта се на машини за савијање (нумерички управљана преса за савијање по ивици, тзв. „абкант” преса), која обезбеђује потребну деформациону силу вертикалним кретањем притискивача. Сва кретања на машини (тискача и материјала који се савија) дефинисана су у њеном координатном систему. У посебним случајевима делови алата могу да имају додатно кретање како би се обезбедила тражена геометрија. Сама преса има своје параметре који условљавају њену примену у одређеним условима. Ту се пре свега мисли на радну дужину притискивача која одређује максималну дужину савијања. Поред тога, могућа је монтажа алата за савијање који су мање радне дужине, са слободним међу простором (Слика 4-14) који омогућава: лакши рад, померање и уклањање савијеног дела са пресе.

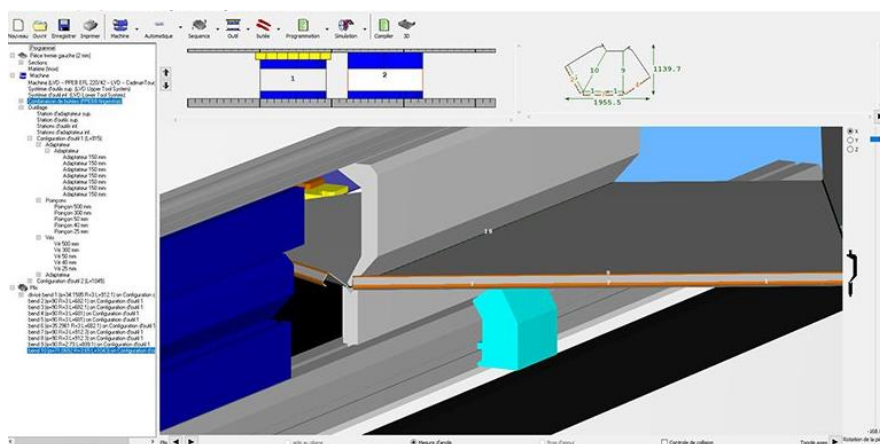


**Слика 4-14** Параметри које треба укључити у моделирање операција савијања.

Софтверска подршка у моделирању операција савијања пружа вишеструке погодности, а, пре свега, брже генерисање САМ модела за израду једноставних и сложених профила. Операција савијања може да се детаљно планира, моделира и прати њено спровођење уз помоћ САМ софтвера (Слика 4-15). Свака измена параметара се обавља једноставније и брже. Са леве стране могу се видети изабране операције савијања по редоследу извршења, са могућношћу промене тог редоследа, уколико

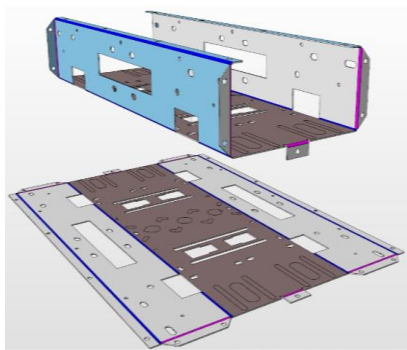


алати дођу у колизију са контуром готовог дела. Положај изабраних алата на *абкант* преси прати се преко „лењира“ и њиховог међусобног одстојања.

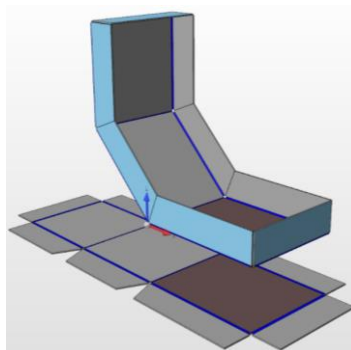


**Слика 4-15** Подешавање геометријских параметара алата на преси за савијање у одговарајућој *CAM* апликацији.

За креирање модела операције савијања, неопходно је као улазну датотеку имати геометријски модел развијене површине савијеног дела. Моделирани припремак (у равни лима) може да буде мање или више сложена контура са или без претходно пробијених отвора (Слика 4-16-а). На њему се добијају и тзв. линије савијања са предложеним редоследом захвата савијања (Слика 4-16-б).



а)

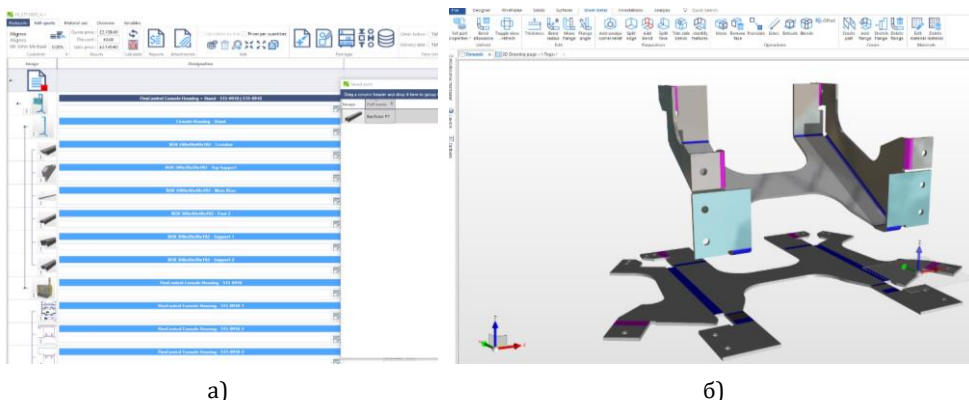


б)

**Слика 4-16** Модел савијеног дела и њихова развијена дужина након пробијања и просецања.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> [www.radan.com](http://www.radan.com)

Добијање развијене форме припремка, као и линија савијања са редоследом захвата, обавља се полу-аутоматски у одговарајућим модулима CAD/ CAM апликације намењеним дизајнирању делова од лима (*sheetmetal part design*). У одговарајућим CAM модулима, такође намењеним моделирању захвата савијања делова од лима, учитавају се претходно припремљени 3D модели припремка (лима) са свим потребним детаљима и редоследом савијања. У наредном кораку се, за планирани редослед и одлике захвата савијања и облик припремка, генерише листа потребних алата са свим геометријским одликама (Слика 4-17).



**Слика 4-17** Приказ етапа моделирања операције савијања:  
(а) листа потребних алата са свим релевантним геометријским одликама и  
(б) модел изратка након примењених предложених захвата савијања.<sup>7</sup>



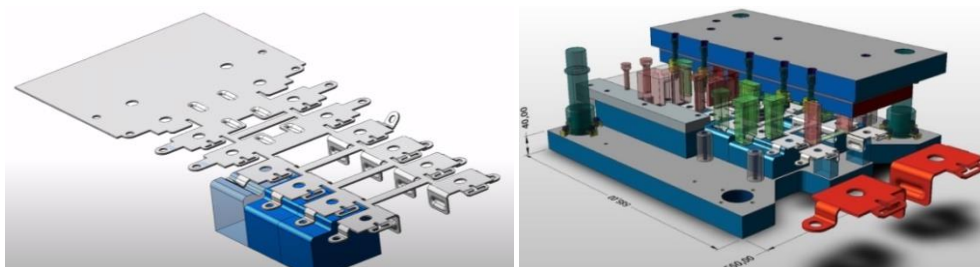
**Слика 4-18** Свијање на абкант преси у два различита алата<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Преузето са [www.radan.com](http://www.radan.com)

<sup>8</sup> Преузето са <https://kdmfab.com/sheet-metal-punching/>

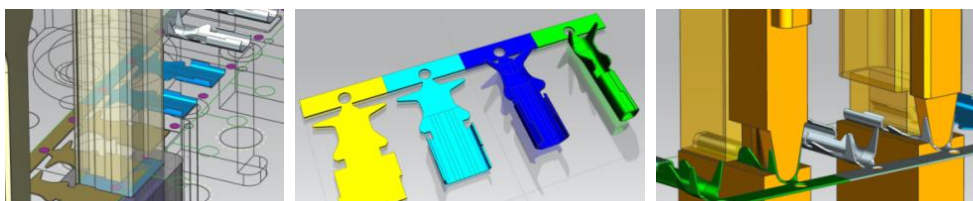


Поред описаног процеса појединачног савијања на *абкант* пресамa, савијање у масовној и великосеријској производњи врло често срећемо и у комбинованим алатима, најчешће, са пробијањем, просецањем и дубоким извлачењем, који у низу узастопних корака (захвата) омогућавају добијање готовог дела и врло сложене контуре из непрекидне, покретне траке лима (Слика 4-18). Процес савијања се најчешће реализује у последњим корацима, на изласку траке из алата, како би се омогућио неометани транспорт траке кроз алат (Слика 4-19).



**Слика 4-19** Приказ симулације обављања сложене операције која укључује захвате пробијања, просецања и савијања у тзв. комбинованом алату<sup>9</sup>.

Моделирање сложених операција у (*sheetmetal processing*) CAM апликацији омогућава детаљну симулацију промене облика обратка у току спровођења моделираних захвата. На слици (Слика 4-20) је могуће видети облик обратка обојен различитим бојама након обављања сваког захвата - пробијање потребних отвора са уклањањем вишка материјала са траке и постепеним савијање до коначног облика.



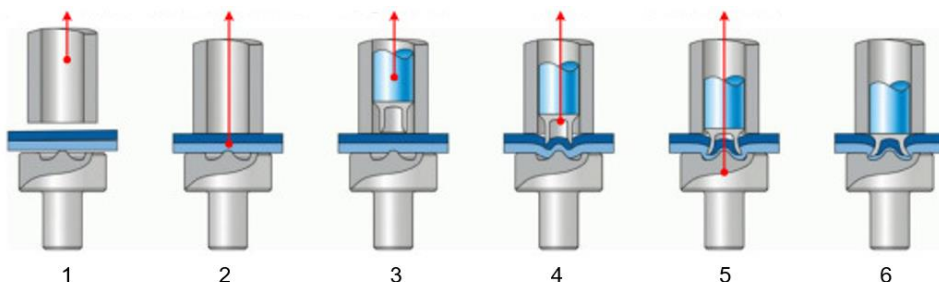
**Слика 4-20** Модел пробијања и просецања са савијањем у комбинованом алату.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=2y88XaklBdQ&ab\\_channel=TOOLENGAGEDKeyCreatorM%C3%A9xico](https://www.youtube.com/watch?v=2y88XaklBdQ&ab_channel=TOOLENGAGEDKeyCreatorM%C3%A9xico)

<sup>10</sup> <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/progressive-die-design.html>

### 4.3 ОПЕРАЦИЈЕ СПАЈАЊА ЛИМОВА ПЛАСТИЧНОМ ДЕФОРМАЦИЈОМ

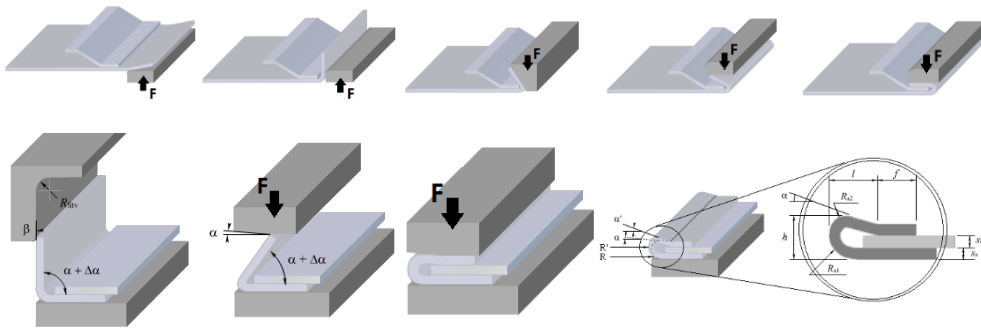
Технологије спајања лимова у индустријским условима увек представља задатак који треба да се реши што бржим и поузданијим поступком али технолошки исплативом технологијом. Поред технологије заваривања, све више су у употреби процеси пластичног деформисања било појединачним закивањем (Слика 4-21, Слика 4-21) или савијањем, код којих се велике дужине лимова спајају специјалним равним или кружним алатима.



**Слика 4-21** Спајање лимова деформабилним елементима.

За ову врсту спајања није потребна припрема отвора или вијчаних веза - Слика 4-21 (1). Довољно је позиционирати два лима који се спајају испод специјално профилисаних алата на линији ударног дејства (2). Након контакта са површином лима услед ударног дејства притискивача (3), код специјалног везног деформабилног елемента добија се иницијални продор по дебљини лима (4). Након притиска доњег притискивача (5), добија се трајна деформација у зони спајања која са горње стране нема никаквих трагова (6), док са доње стране постоји само траг доњег алата у спојеном лиму. Услед пластичне деформације везивног елемента повећане тврдоће и самих лимова у зони дејства, добија се нераскидива и поуздана веза.

Технологија спајања савијањем представља брз и поуздан поступак за праволинијске спојеве велике дужине. Специјални поступци преса-вијања (*folding*) све више налазе примену код међусобног спајања лимова код којих се добија раздвојива веза без додатних елемената за везивање. Данас је то један од незаобилазних процеса у савременој ауто-индустрији, грађевинарству, бродоградњи, авио-индустрији, индустрији паковања итд., који се јавља у различитим технолошким варијантама (Слика 4-22).



Слика 4-22 Поступци савијања у циљу спајања лимова и анализа деформација споја.

Поступак се своди на обраду (припрему) лима и његових ивица за везивање, позиционирање и савијање алатима, остварујући раздвојиву везу. Постоји неколико врста оваквих спојева, који су развијени за различите могућности приступа ивицама лима, као и технологије које се могу применити. Разликују се три ивична (захвата) савијања: 1) савијање под углом  $90^\circ$ , 2) савијање пре спајања под углом  $135^\circ$  и 3) затварање споја савијањем под углом од  $180^\circ$  (*hemming*). Цео процес се одвија узастопно један за другим великом брзином. Ови захвати се такође моделирају, а пролазни облици споја симулирају у одговарајућим САМ модулима. Проблем који се јавља је слабљење споја услед ефекта еластичног исправљања који, у зависности од материјала, може бити мање или више присутан. Из тих разлога врши се корекција геометрије алата, смањују се углови како би се остварила потребна контактна површина и чврстоћа споја. Сличан спој два лима може се остварити и технологијом дубоког извлачења, која налази примену у прехранбеној индустрији (затварање лименки).

Уколико се ради о великосеријској производњи (ауто-индустрија), са неправилним великим контурама у простору, потребни су специјални алати који остварују савијање појединих сегмената крајева лимова како би се добио жељени спој са задовољавајућом чврстоћом (Слика 4-23).



**Слика 4-23** Спајање лимова сегментним савијањем крајева.

Друго решење представљају роботски вођени мали профилни ваљци, којима се спајају ивице лимова, по задатој неправилној 3D контури, обезбеђујући непогрешиву путању у простору и контролу притиска приликом савијања на самом споју (Слика 4-24).



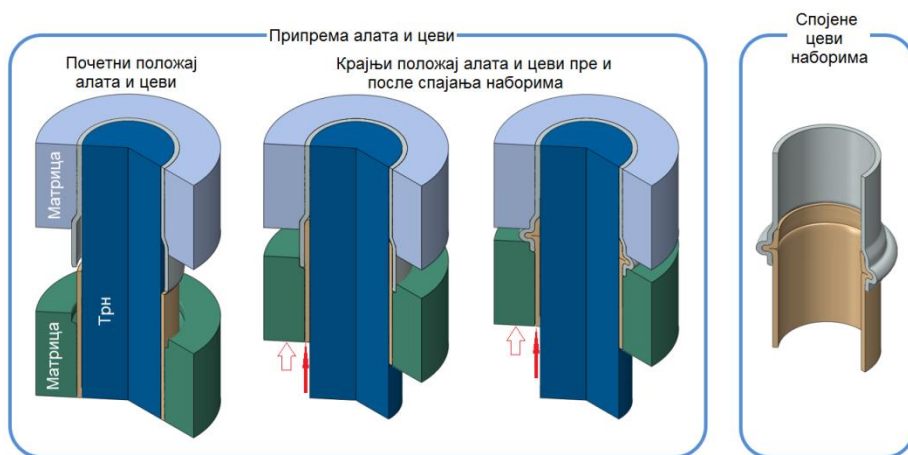
**Слика 4-24** Спајање лимова по крајевима профилним ваљцима.<sup>11</sup>

Посебне технологије за спајање деформабилних цеви од различитих материјала данас налазе примену свуда где је то могуће без потребе заваривања по обиму споја (Слика 4-25). Добија се квалитетан спој по

---

<sup>11</sup> EAA Aluminium Automotive Manual – Joining, Version 2015 ©European Aluminium Association (auto@eaa.be)

обиму који задовољава критеријуме чврстоће, али и заптивања до одређених вредности унутрашњих притисака. Претходно проширена горња цев са трном се, на месту споја, поставља у специјалну непокретну матрицу, која има профилисану површину за спајање (Слика 4-25).



**Слика 4-25** Модел алата и обратка у неколико фаза поступка спајања цеви наборима по обиму.

Покретна матрица и доња цев, која се спаја аксијалним притисцима, доводе се у контакт са непокретном цеву помоћу профилисаног алата. Након контакта на предвиђеној дужини преклопа, почиње и обострано пластично деформисање крајева цеви у нераздвојиву везу, чија чврстоћа зависи од крајње достигнутог притиска покретне и непокретне матрице. Непокретни трн гарантује: тачно вођење, немогућност извијања, контролисану пластичну деформацију и глаткост унутрашње површине споја (Слика 4-25). *CAE/CAM* моделом треба дефинисати границе течења за обе врсте материјала цеви како би се постигла равномерна пластична деформација у самом споју, као и потребни аксијални притисци алата и цеви.

#### 4.4 ОПЕРАЦИЈЕ ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА

Процеси дубоког извлачења (*deep drawing*) представљају све већи изазов за технологију пластичног деформисања јер се захтевају врло сложене контуре како симетричних тако и асиметричних, затим сложених просторних облика у комбинацији са процесима пробијања и просецања. У таквим условима, употреба *CAD/CAE* и *CAPP/CAM* рачунарских програмске апликација у моделирању израдака, припремака и процеса долази до пуног изражаја како би се код геометријски сложенијих алата

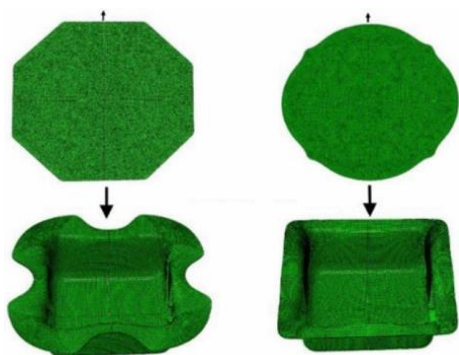


предупредили могући проблеми и недостаци. Планирање процеса дубоког извлачења обухвата:

1. моделирање облика изратка са свим посебним геометријско-технолошким елементима из класе *Sheetmetal*,
2. одређивање димензија и облика припремка,
3. одређивање броја потребних технолошких операција,
4. дефинисање геометрије и облика алата,
5. дефинисање потребних кретања и средства за подмазивање,
6. примена држача лима и кочећих ребара и
7. генерисање симулације израде.

Код једноставних облика цилиндричног облика, припремак је готово увек кружни исечак лима који се, кроз једну или више технолошких операција, извлачи тискачем кроз матрицу. Сложени просторни облици извучених делова захтевају детаљну анализу облика и величине припремка (Слика 4-26).

Облик припремка без и са оптимизацијом



Облик готовог дела без и са оптимизацијом

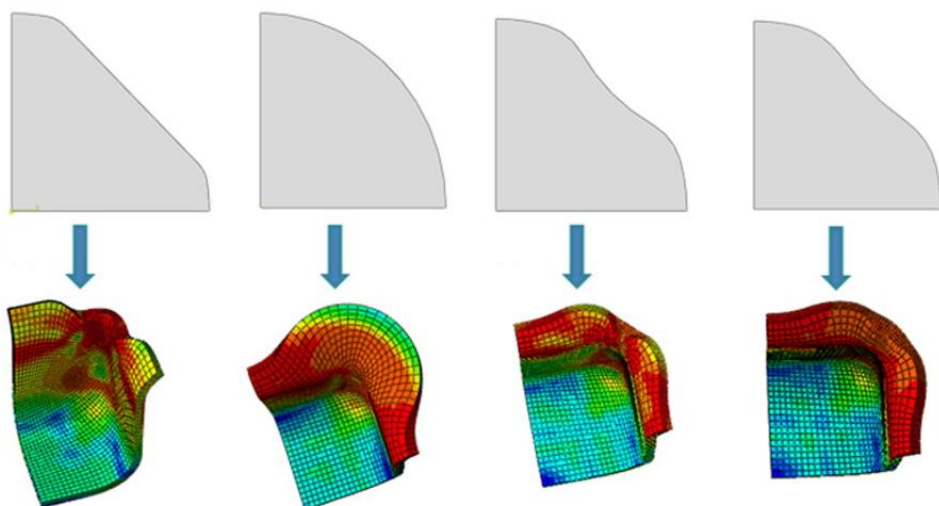
а)

б)



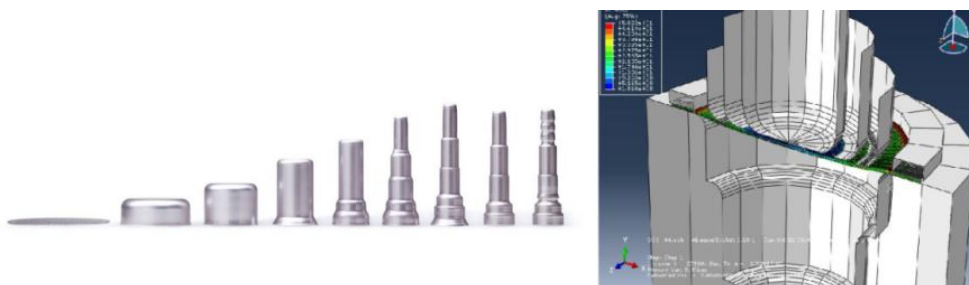
**Слика 4-26** Оптимизација модела припремка кутијастог (а) и сложеног дела (б).

Како су делови алата у непосредном додиру са лимом, до изражаја долазе вредности њихових прелазних радијуса и квалитет обраде њихових радних површина. Вредности радијуса имају одлучујући утицај на стабилност процеса дубоког извлачења како не би дошло до нарушавања структуре лима, односно до пуцања и разарања. Сложена просторна геометрија готовог дела захтева сложену контуру припремка, која би задовољила континуалан процес извлачења и критеријуме оптималне количине потребног материјала (Слика 4-27).



**Слика 4-27** Оптимизација модела припремка кутијастог дела.

Број потребних технолошких операција може се одредити према димензијама и захтеваној геометрији уз ограничавајући фактор степена деформације за изабрани материјал (Слика 4-28). Што је већи број операција, то је већи број потребних алата и алатних машина (хидрауличних преса) који су потребни да би се део израдио. Геометрија алата за прву и наредне операције извлачења се разликује по облику радних површина.



**Слика 4-28** Технологија добијања дела у 8 технолошких операција.

У САМ модулима намењеним моделирању алата за дубоко извлачење формирају се облици алата који одговарају сукцесивним операцијама извлачења (са различитим пречницима тискача и одговарајућим пречницима матрица) како би се добили одговарајући прелазни облици. Поред оваквих решења, постоје и прогресивни алати који на једној алатној машини, у више узастопних корака, формирају завршни облик (Слика 4-29).

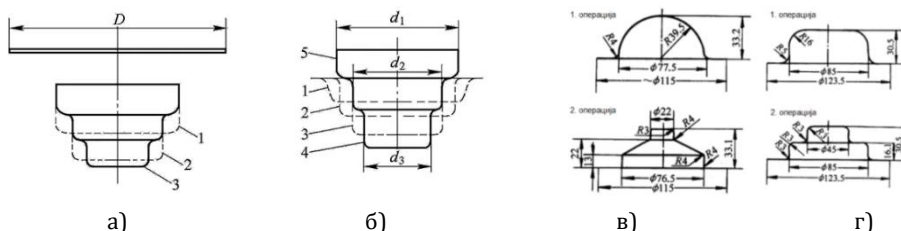




**Слика 4-29** Прогресивни алати са припремком облика траке<sup>12</sup>.

Модел технолошког поступка обухвата модел процеса пробијања технолошких отвора за позиционирање и вођење траке у првим корацима, као и ослобађање припрема од остатка траке како би се обезбедило неометано дубоко извлачење и транспорт дела кроз наредне операције.

За дубоко извлачење степенастих прелазних делова, модел геометрије прелазних делова се обично јавља у две варијанте како би укупан степен деформације био што равномерније распоређен по прелазним операцијама. Прва варијанта облика предвиђа у првој операцији извлачење највећег траженог пречника на најмањој дубини (Слика 4-30 -а -1), а онда извлачење следећег мањег пречника на већој дубини (Слика 4-30 -а -2), да би трећим алатом достигли коначну дубину са минимално траженим пречником (Слика 4-30 -а -3). Друга могућа варијанта подразумева дубоко извлачење дела на четири међупречника који нису коначни да би тек коначан облик био добијен петим тискачем, који управо има облик коначног дела са пречницима  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$  (Слика 4-30 -б).

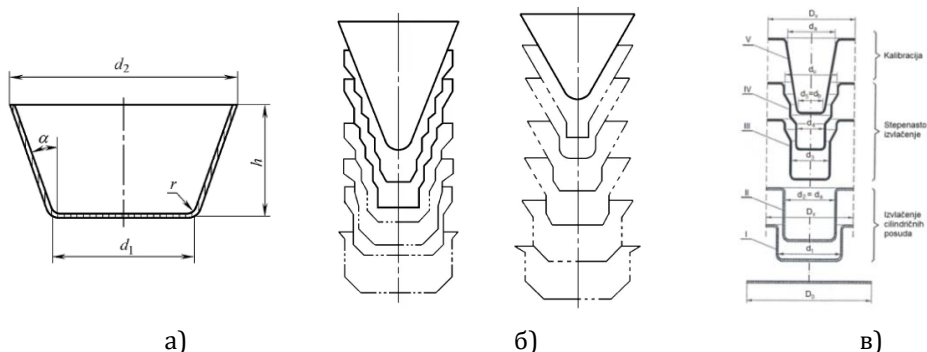


**Слика 4-30** Модел за степенasti део.

Модел за сложени део подразумева дубоко извлачење у првој операцији до коначне дубине и већим прелазним радијусима да би се коначни прелазни радијуси добили у другој операцији (Слика 4-30 -в и -г). Оба дела су са венцем који је свој коначни пречник добио у првој опе-

<sup>12</sup> <https://larsontool.com/tour/tour-deep-drawing/>  
<https://kdmfab.com/sheet-metal-punching/>

рацији, уколико нема обрезавања, што је врло ретко код деформације лима због ефекта анизотропије.



Слика 4-31 модел извлачења дубљег и плићег конусног дела.<sup>13</sup>

За дубоко извлачење конусних облика треба узети у обзир следеће препоруке: за плићи конусни део, где је однос висине  $h$  и пречника  $d_2$  на врху готовог дела мањи од 0.25 до 0.30 са углом  $50^\circ$  до  $80^\circ$  препорука је да се део извлачи у једној технолошкој операцији (Слика 4-31-а).

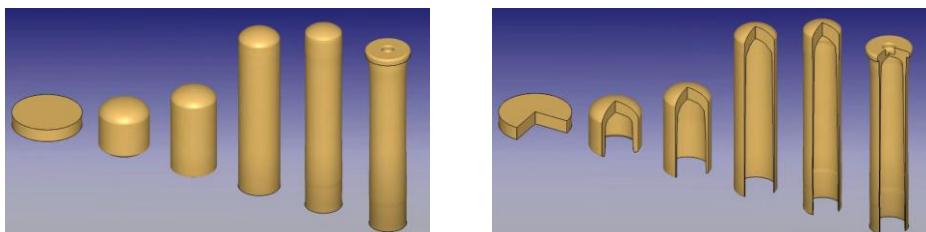
За средње дубине готовог дела, где је однос висине  $h$  и пречника  $d_2$  на врху готовог дела од 0.3 до 0.7 са углом од  $15^\circ$  до  $45^\circ$ , ако је однос дебљине и пречника припремка већи од 0.025, постоји препорука да се део извлачи у једној технолошкој операцији. Уколико је однос дебљине и пречника припремка од 0.015 до 0.2, део се извлачи у једној технолошкој операцији, али са држачем лима и кочећим ребрима како би се повећали нормални напони у радијалном правцу и тиме избегли стварање набора на венцу. Када је однос дебљине и пречника припремка мањи од 0.015, врло лако долази до стварања набора, па су потребне две технолошке операције са држачем лима. За велике конусне површине, однос висине  $h$  према пречнику  $d_2$  већи од 0.7, односно 0.8 и са углом  $\alpha$  од  $10^\circ$  до  $30^\circ$  треба применити један од следећих САМ модела, односно прелазних транзиционих решења (Слика 4-31 -б и -в).

#### 4.4.1 ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ СА СТАЊЕЊЕМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА

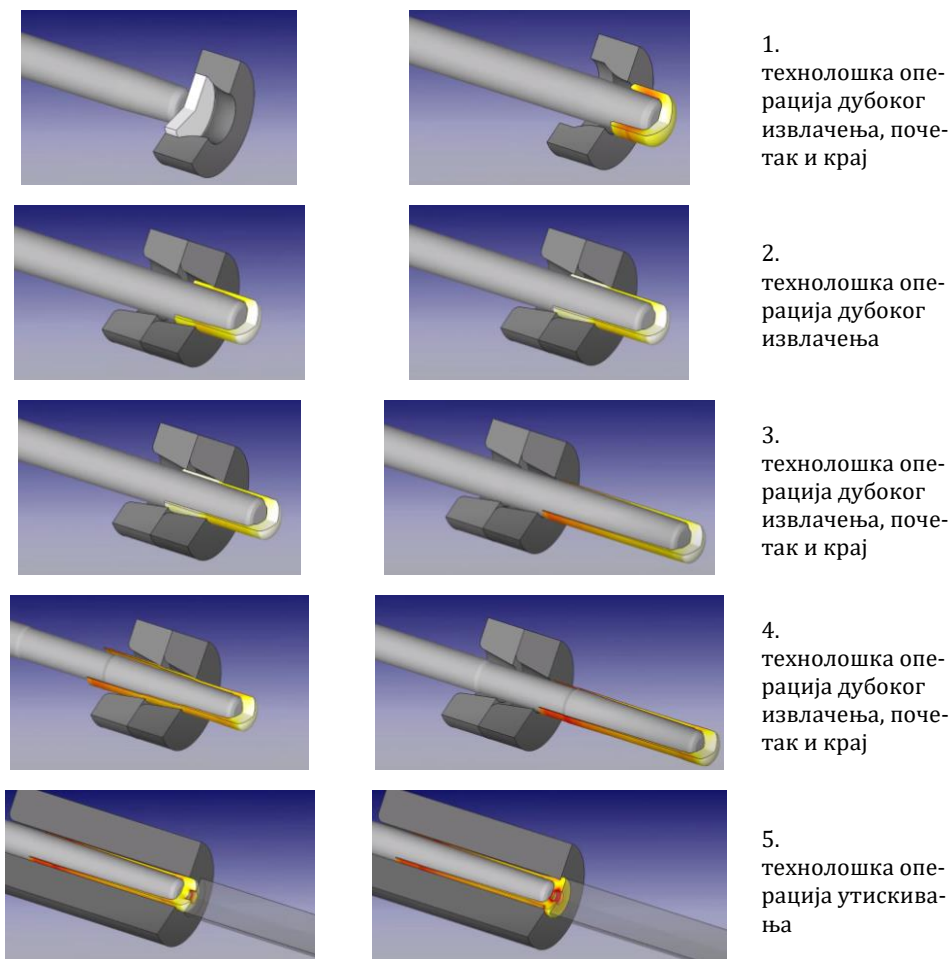
Израда оваквог елемента представља сложенији технолошки задатак у великосеријској и масовној производњи, јер се укупан степен деформације посматра као збир степена деформације по пречнику и по дебљини. Из дебљег припремка добијеног просецањем лима (Слика 4-32) добија се дубоко извучен део који има изразито танке зидове. Да би се

<sup>13</sup> <https://www.machinemfg.com/metal-stamping-and-die-design-deep-drawing/>

дошло до тако великог степена деформације, део се извлачи кроз низ узастопних конусних матрица са цилиндричним радним дужинама.



Слика 4-32 Спољашњи изглед и изглед дела у пресеку.

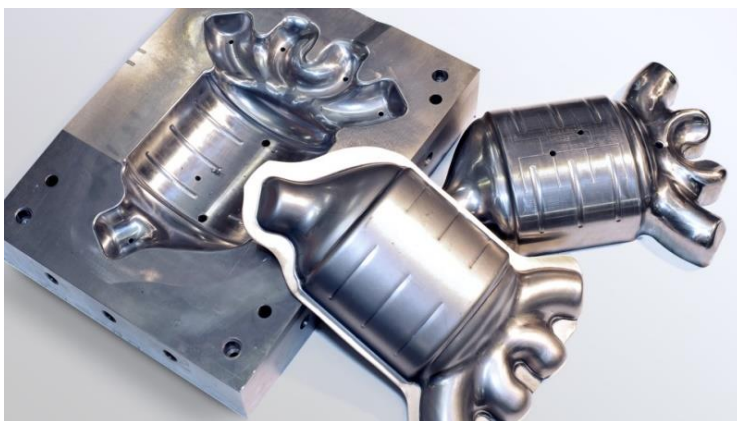


Слика 4-33 Приказ секвенци из симулације технолошког поступка дубоког извлачења са стањењем дебљине зида.

Највећи степен деформације по пречнику и дебљини јавља се у првој технолошкој операцији (Слика 4-33 -1), да би се у наредним опера-

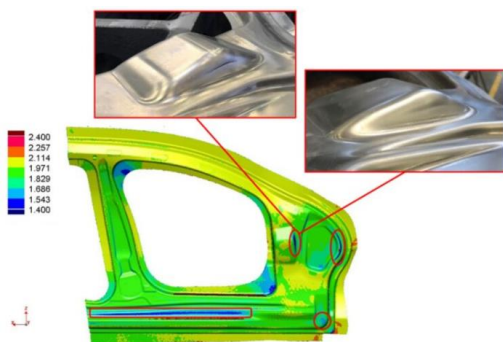
цијама смањивала само дебљина зида и обављале врло мале корекције пречника извученог дела. Последња технолошка операција *CAM* модела односи се на обликовање дна извученог дела (запреминско обликовање) где се врши утискивање одговарајућег облика (Слика 4-33-5).

У савременој аутомобилској индустрији потребно је обликовати делове од лима веома сложене геометрије дубоким извлачењем. Тако сложена геометрије делова захтева одговарајућу геометрију алата (калупа за обликовање) (Слика 4-34). *CAE/CAM* модел технолошког поступка може у великој мери помоћи анализом и симулацијом процеса пластичне деформација лима омогућавајући генерисање одговарајућег 3D геометријског модела алата, као и утврђивање одговарајућих технолошких одлика процеса који ће осигурати равномерне деформације и избећи појаву грешака.



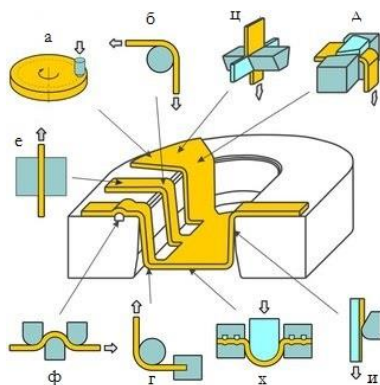
**Слика 4-34** Алат и половина готовог дела издувног система код аутомобила.

Појединачни алати за масовну израду позиција шасија аутомобила представљају комплексне робусне конструкције чијим се једним радним ходом добијају врло сложене просторне површине високе тачности у сва три правца. Код моделирања оваквих процеса, деформациона сила по јединици површине није велика, али потпуно контролисана пластична деформација, сила држања лима, стањење лима на критичним местима, морају бити у прописаним границама, како би крајњи производ испунио строге захтеве. Утврђивање критичних места у раној фази креирања геометријског модела се спроводи одговарајућим нумеричким анализама пластичног деформисања припремка методом коначних елемената (Слика 4-35).



**Слика 4-35** Анализа критичних степена деформације делова шасије аутомобила.

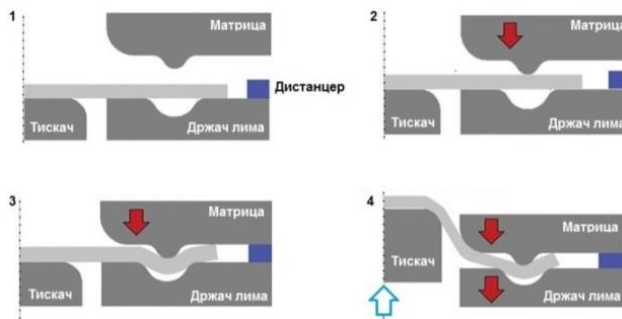
Услови трења код несиметричних, неправилних алата се посматрају парцијално по обиму јер нису исти, иако се ради о јединственој површини лима која се деформише у сложенем алату. Углови алата са прелазним радијусима представљају класично дубоко извлачење, где у радијалном правцу доминирају деформације истезања, док у тангенцијалном правцу деформације притиска (Слика 4-36 -а, -б, -ц, -д). На равним деловима алата преко заобљених ивица постоји чисто истезање припремка (Слика 4-36 -е). Тамо где је потребно повећање нормалних напона у радијалном правцу, у алатима се постављају кочећа ребра са могућношћу подешавања њихове дубине (Слика 4-36 -ф). На заобљеним ивицама алата при дну јавља се чисто истезање (Слика 4-36 -г), док је на самом дну извученог елемента присутно двоосно развлачење лима у области еластичности (уколико нема промене облика дна), односно у области пластичности ако се мења облик дна (Слика 4-36 -х). Иако се ради о извлачењу без стањења, неки делови лима трпе изузетно велике деформације, па се јавља и стањење лима (Слика 4-36 -и) које може да буде и захтевано сложенем геометријом дела.



**Слика 4-36** Модел технологије дубоког извлачења несиметричног дела.

Објединити све наведене елементе код просторних површина, каквим обилују шасије аутомобила, представља сложен задатак који се може решити CAE/CAM симулацијама.

Да би се параметри оваквог процеса задржали у задатим границама, врло често се на алатима постављају дистанцери који имају улогу прецизне контроле одстојања матрице од држача лима током читавог процеса. На почетку процеса дубоког извлачења (Слика 4-37 -1), матрица са кочећим ребром и држач лима налазе се на довољном одстојању како би било могуће постављање припремка у тачно предвиђену позицију на алату. Примицањем матрице у овом примеру, долази до контакта кочећег ребра (Слика 4-37 -2) са површином лима али и деформације лима услед даљег хода матрице са кочећим ребром (Слика 4-37 -3).



**Слика 4-37** Модел дубоког извлачења са кочећим ребрима и дистанцерима.

На тачно предвиђеном одстојању матрице, еластичним дистанцером, од држача лима, почиње дубоко извлачење тискачем. Контролисано одстојање држача лима и матрице гарантује да ће кочеће ребро постићи довољни пораст нормалног напона у радијалном правцу (Слика 4-37 -4), односно затезање лима, како би процес био реализован без набора.



**Слика 4-38** Кочећи дистанцери или одстојници.



Без оваквих елемената алата и тачног вођења процеса, дубоко извлачење сложених и неправилних геометрија какве налазимо, на пример у ауто-индустрији, готово да није могуће (Слика 4-38).



**Слика 4-39** Горњи делови (а, б) и доњи делови алата (в, г) за дубоко извлачење позиција шасије аутомобила<sup>14</sup>.

Велике површине лима потпуно неправилног облика, прилагођеног геометрији готовог дела са парцијално контролисаним нормалним напонима у радијалном правцу, извлаче се у алатима великих габарита како би се добила задовољавајућа продуктивност производних процеса (Слика 4-39). У реалној производњи делова аутомобилске шасије потребно је да се измена ове врсте алата обави брзо (тзв. *Single Minute Exchange of Die -SMED* операција) и избегне застој производње. Велике димензије ових алата, међутим, претпостављају велике тежине и тешко руковање. Из тог разлога, они се обично израђују од ливених шупљих структура на које се додају специфични делови алата који у директном контакту са лимом, формирају жељени облик (Слика 4-40).

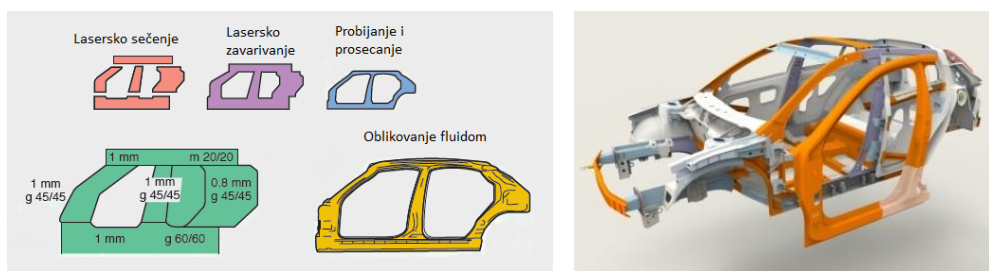
<sup>14</sup> <https://en.asalsoy.com/index.php>  
<https://en.asalsoy.com/2-automotive-dies>





**Слика 4-40** Алат великих габарита (горњи и доњи алат) за дубоко извлачење на преси<sup>15</sup>.

Савремена ауто-индустрија иде и корак даље, односно креирање сложених припремака од тзв. кројених лимова (Слика 4-41), који ће повећати постојаност шасије аутомобила на елементима који су јако изложени атмосферском утицају и корозији. *CAM* модел извлачења таквог елемента на самом почетку треба да предвиди неједнако деформабилно понашање различитих материјала у истом алату, односно добијање крајњег облика са жељеним технолошким карактеристикама и димензионом тачношћу. Уколико се ради о мањим деформацијама, без оштрих прелаза и углова, могућа је примена технологије извлачења флуидом.

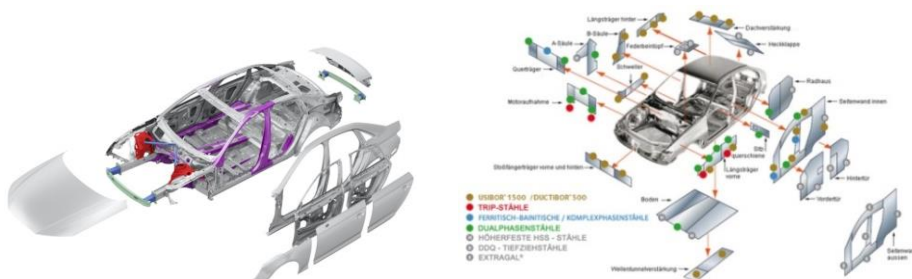


**Слика 4-41** CAD/CAM модел делова шасије бочне стране аутомобила.

Овакви елементи налазе све ширу примену свуда где је потребна примена различитих материјала. То се користи како за спољашње површине, тако и унутрашње деформабилне елементе каросерије (Слика 4-42), које ће спречити повређивање путника али и упијање великих

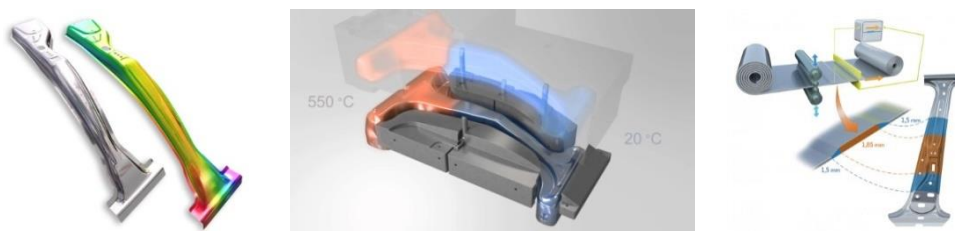
<sup>15</sup> <https://en.asal soy.com/2-automotive-dies>  
<https://en.asal soy.com/detail-16-die-practice-works>

ударних сила приликом судара са покретном или непокретном препреком.



Слика 4-42 САПП модел кројених лимова за шасију аутомобила<sup>16</sup>.

Осим различитих врста материјала лимова, могућа је и примена лима са различитом дебелином тамо где је потребна већа крутост и чврстоћа. Такав припремак захтева променљиви зазор између горњег и доњег алата, пре и после пластичног деформисања дубоким извлачењем, али и парцијално загревање припремка у самом алату како би се добила континуална деформација (Слика 4-43).



Слика 4-43 Модел В стуба аутомобила и алата.

## 4.5 ОПЕРАЦИЈЕ ФИНОГ ПРОБИЈАЊА И ПРОСЕЦАЊА

Да бисмо излагање о САМ моделима обраде лима привели крају и постепено прешли на технологије запреминског обликовања, овакав обим уџбеника захтева и појашњење технологије финог пробијања и просецања (Слика 4-44). То је технологија намењена велико-серијској и масовној производњи, која готово истовременим дејством три силе на специјалним пресамa вишеструког дејства и у посебним алатима, гарантује добијање финалних производа веће дебелине врхунског квалитета. Поред силе пробијања и просецања, код ових технологија неопходна је сила утискивања контурног зуба који прати ивицу раздвајања и гарантује

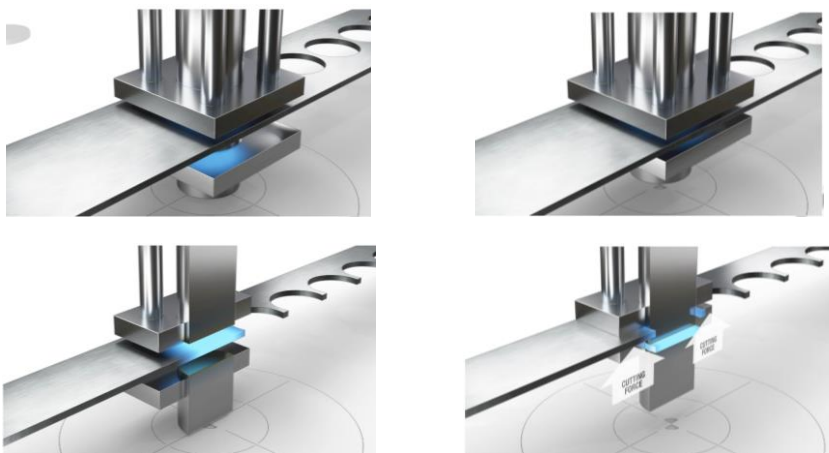
<sup>16</sup> <https://www.tailored-blanks.com/en/applications-automotive-industry>

је смањење напона истезања у зони раздвајања. Тиме се повећава зона чистог смицања на самој површини раздвајања и бољи квалитет резне површине.



**Слика 4-44** Елементи добијени финим пробијањем и просецањем.

Да би се елиминисале повијене ивице и савијање готовог елемента, у алату се обезбеђује сила придржавања супротног смера од дејства поменуте силе просецања. То значи да пројектовани алат мора да обезбеди велики обострани, непрекидни притисак просеченог језгра, како би се добио висок квалитет и тачност готовог дела. Овакви алати се израђују са врло високом тачношћу димензија и квалитетом резних површина алата. Пројектанти ових алата узимају у обзир деформабилне карактеристике дебљих лимова за добијање плићих утиснутих профила, озубљења и гравура савремених производа (Слика 4-45).



Пре контакта

Контакт алата и тракастог припремка

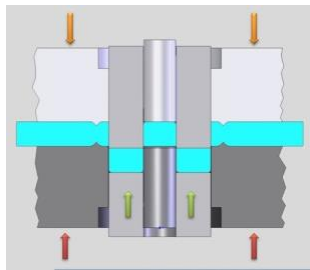
**Слика 4-45** CAM Модел операције финог просецања у алату из тракастог припремка<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> <https://www.feintool.com/en/technology/fineblanking/>

Ова технологија налази велику примену у ауто-индустрији, производњи електромотора мањих и већих снага, специјалних компоненти итд. Тиме обрада дебелих лимова има елементе класичне технологије обједињене са запреминским обликовањем, јер су потребне велике силе утискивања и плитког обликовања захтеване геометрије на специјалним пресама троструког дејства (Слика 4-46). Обједињавање технологија обраде дебелих лимова са запреминским обликовањем данас је све више у примени, јер се тиме добијају оптимизована лака конструктивна решења која испуњавају строге захтеве безбедности.



а)



б)



в)

**Слика 4-46** НУ преса за фино пробијање (а), модел алата и операције финог пробијања (б) и део добијен у процесу финог пробијања и утискивања (в).

## 4.6 ОПЕРАЦИЈЕ КОВАЊА

### 4.6.1 ТОПЛО КОВАЊЕ У ОТВОРЕНИМ АЛАТИМА

Суштинска разлика запреминског обликовања у односу на претходне технологије огледа се у пластичној деформацији која је присутна у сва три правца уз присуство много већих деформационих сила и унутрашњих напона по структури деформабилног материјала. По правилу то су технолошки поступци за чије одвијање је потребно користити посебне производне капацитете: пресе и опрему за обликовање, сложене алате, и, често, пећи које омогућавају загревање припремака и обрадака на високим температурама између појединих операција. Такође, за моделирање, симулацију и анимацију операција запреминског обликовања, потребно је користи посебну врсту софтвера које је, према карактеристикама, нека врста CAE/CAM система.

Почетна температура рекристализације челика је око 727°C, али се температура од 800°C углавном користи као тзв. температурна граница

разврставања технолошких поступака ковања. Технологије на температурама изнад  $800^{\circ}\text{C}$  представљају топло ковање, док се технологије између  $300^{\circ}\text{C}$  и  $800^{\circ}\text{C}$  називају полутопло или полувруће ковање, да би се за ковање на собној температури користио назив хладно ковање. Ради се о технологијама које се врло често срећу у индустријској пракси производње металних елемената са једноставном, али и сложеном геометријом.

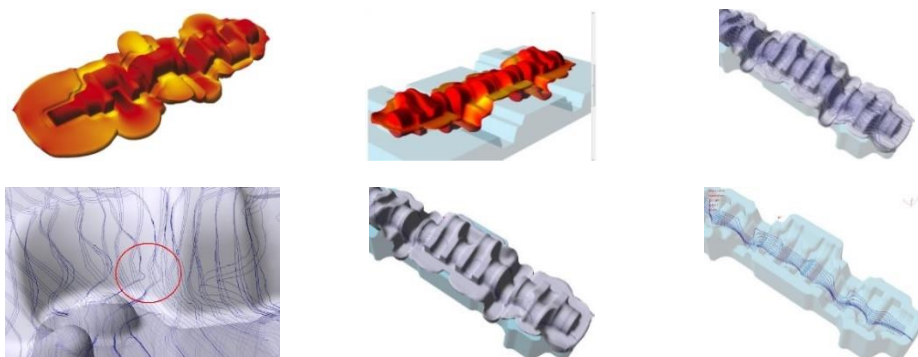
Ако се за опис и представљање пластичног деформисања топлим ковањем у отвореним калупима може издвојити репрезентативни елемент, онда је то коленасто вратило (*crankshaft*) мотора са унутрашњим сагоревањем (Слика 4-47). За операције ковања се обично користе посебни CAE/CAM софтвери. Они представљају комбинацију софтвера који обављају нумеричке инжењерске анализе (најчешће методом коначни елемената) и софтвера који симулирају промену облика услед деформације. За кориснике је веома важно да прате унутрашње стање материјала (структуре) и облика отковка након сваког захвата (ударца бата).



**Слика 4-47** Коленасто вратило као врхунски производ топлог ковања.

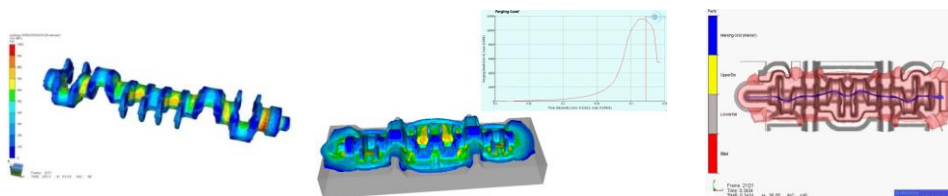
Сложена тродимензионална геометрија коленастог вратила се одражава на сложену геометрију самог отковка. Пре него што се пређе на само моделирање операције ковања, потребно је моделирати геометрију отковка који се разликује у односу на коначни облик изратка (коленастог вратила). Те измене, које се најчешће огледају у додатим прелазним заобљењима и конусним површинама, потребно је начинити како би се омогућило лако одвајање или вађење отковка из алата по сваком обављеном захвату ковања. Подеона раван је обично у две или чак три равни у којима се вишак материјала истискује до тзв. „магацина” (Слика 4-48).





**Слика 4-48** Приказ промене облика отковка након захвата ковања као и симулација линија течења материјала у процесу топлог ковања коленастог вратила (QForm CAE/CAM софтвер).

Промена напона у самом отковку условљава нестационарно поље деформација чији дисконтинуитет неминовно води лошем отковку, односно лошем готовом делу. Из тог разлога је потребно пратити линије течења на тродимензионалном моделу, али и у појединим равнинама где се јасно уочава њихов континуитет и густина (Слика 4-48 и Слика 4-49). CAE/CAM софтвер, у коме се моделирају одлике захвата ковања – правци дејства силе, подеоне равни (калупне форме са „магацинима”) и промена силе деформисања у времену, помаже да се утврде линије течења материјала и степен пластичне деформације по читавој запремини отковка. Превелики пораст деформационе силе у радном ходу указује на велику пластичну деформацију која може да изазове скривене пукотине у структури, што може изазвати пуцање структуре у току експлоатације која се одликује великим променљивим динамичким оптерећењима.



**Слика 4-49** Пластичне деформације и линије течења са променом деформационе силе (Transvalor FORGE3).

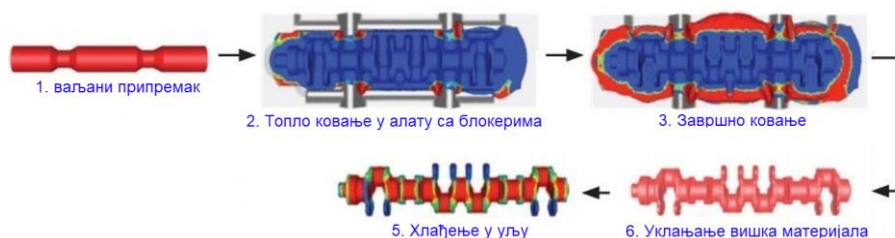
Управо анализирајући степен деформације, CAE/CAM софтвер омогућава инжењеру који моделира процес ковања да утврди оптималан број захвата ковања, односно број и облик алата да би се сложена запремина коначног отковка коленастог вратила добила. Анализа и симулација поступка испуњавања калупне шупљине алата од стране загрејаног припремка представља велики изазов, јер се ради о врло сложеним ала-

тима код којих су потребне посебне препреке (*блокери*) ради усмеравања загрејаног материјала да испуњава и најудаљеније тачке калупне шупљине (Слика 4-50).



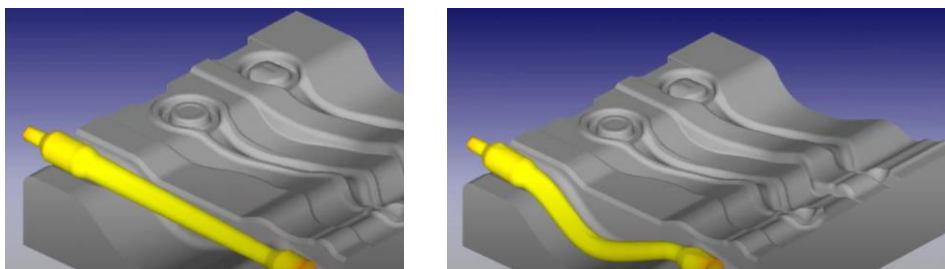
**Слика 4-50** Приказ промене облика обратка током процеса ковања.

Почетни припремак представља ваљани пуни обртни профил. Ковање се одвија у отвореном алату и праћено је великом количином вишка материјала (прелива) због разуте гравуре у више равни. Након операције ковања у више захвата, вишак материјала се уклања у алату за крзање који прати завршну геометрију. Како би се уклонили заостали напони, на крају технолошког поступка се примењује постепено хлађење у уљу (Слика 4-51).



**Слика 4-51** Приказ симулације стања структуре и облика отковка током спровођења технолошког поступка топлог ковања коленастог вратила.

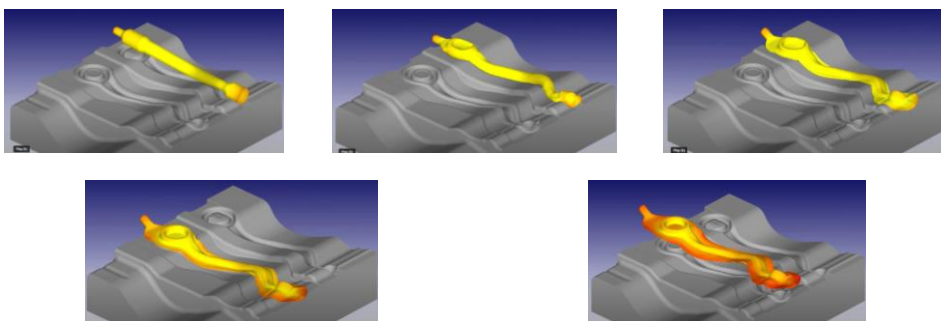
Топло ковање закривљених полука и слободних облика намећу потребу за сложеним припремком и алатима који имају површину раздвајања у више равни (Слика 4-52).



**Слика 4-52** Приказ секвенце симулације топлог ковања закривљених полука.



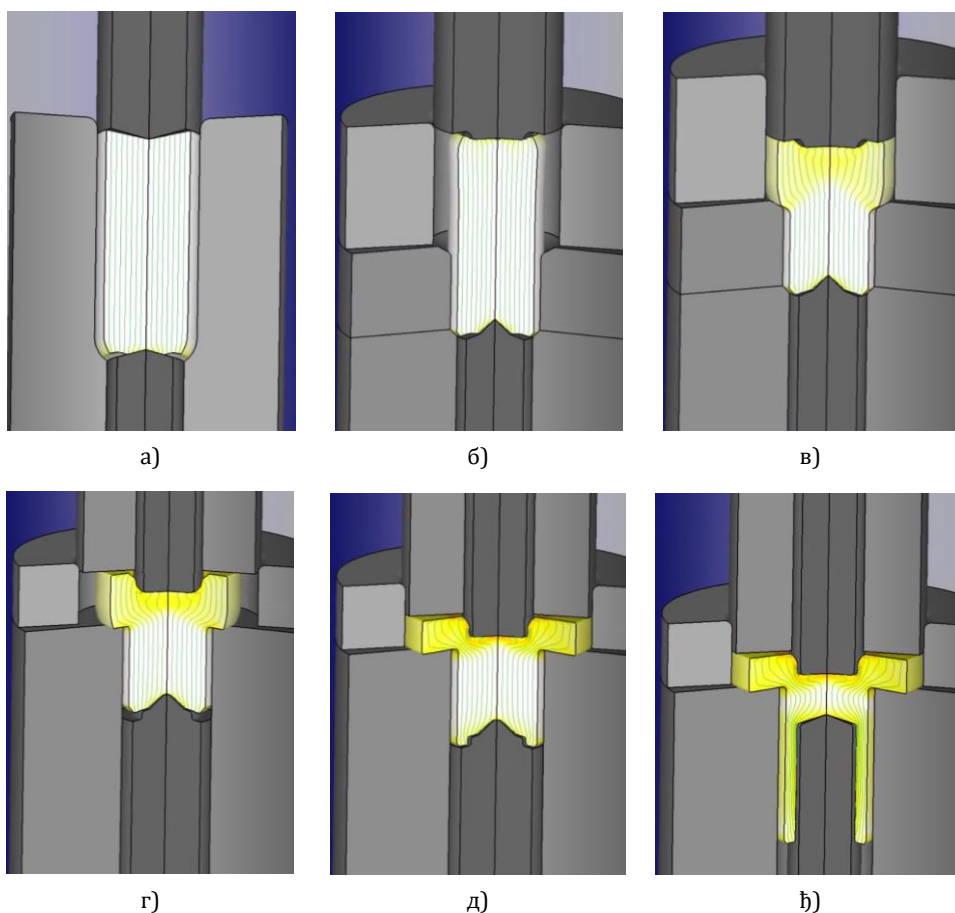
Уколико је потребно да и крајеви полуге добију у току ковања сложене облике, онда се користе сложенији алати са гравуром у истом алату и блокерима који усмеравају загрејани припремак до потпуне испуне калупне шупљине (Слика 4-53). Одређивање облика алата и критичних величина: радијуса и нагиба, деформационе силе и запремине магацина без нумеричке анализе промене облика, односно без моделирања захвата и операција ковања у одговарајућим *CAE/CAM* апликацијама, остају само у домену претпоставки и упорних проба на реалним алатима како би се дошло до успешног решења. За савремена производна окружења која теже високим учинцима у погледу продуктивности и квалитета, такав приступ је неприхватљив те је из тог разлога употреба *CAE/CAM* софтвера за ковање обавезна.



**Слика 4-53** Приказ промене облика отковка у сукцесивним захватима топлог ковања.

#### 4.6.2 ТОПЛО КОВАЊЕ У ЗАТВОРЕНИМ АЛАТИМА

Процес топлог ковања у затвореном алату представља технолошки поступак у коме се остварују већи степени деформације са унапред одређеном количином материјала без потребних вишкова материјала и њиховог одстрањивања након процеса ковања. Тиме се остварује максимални степени деформације и максимална уштеда материјала. Низ слика (Слика 4-54) приказује пример модела операције топлог ковања у затвореном алату са резултатима нумеричке анализе и симулација промене облика цилиндричног припремка. У првој операцији (или захвату) припремак се сабија у једноделној матрици и обликује на страни где се касније формира глава и проширење припремка (Слика 4-54 -а). У другој технолошкој операцији (Слика 4-54 -б, -в) материјал претходно обликованог припремка се сабија, што резултира обликовањем главе вијка у троделној матрици. Линеје течења указују на дејство тискача са профилисаним челом. У наредном алату, главе вијка се додатно сабија дводелним тискачем и истовремено се врши утискивање профилног тискача (Слика 4-54 -г, -д).

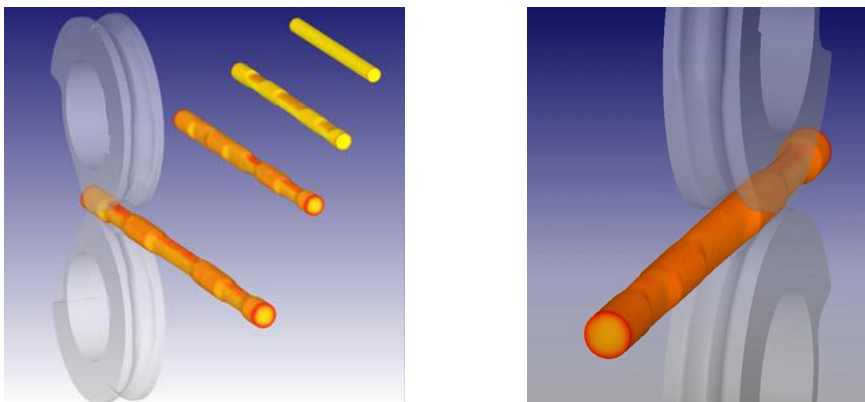


**Слика 4-54** Приказ симулације операције топлог ковања у затвореном алату.

На крају ове технолошке операције, изменом доњег тискача и његовим утискивањем, добијамо интензивно супротносмерно пластично течење материјала (Слика 4-54 -ђ). Линеје течења на попречном пресеку, добијене нумеричком анализом, указују на изузетно велике степене деформације које материјал трпи.

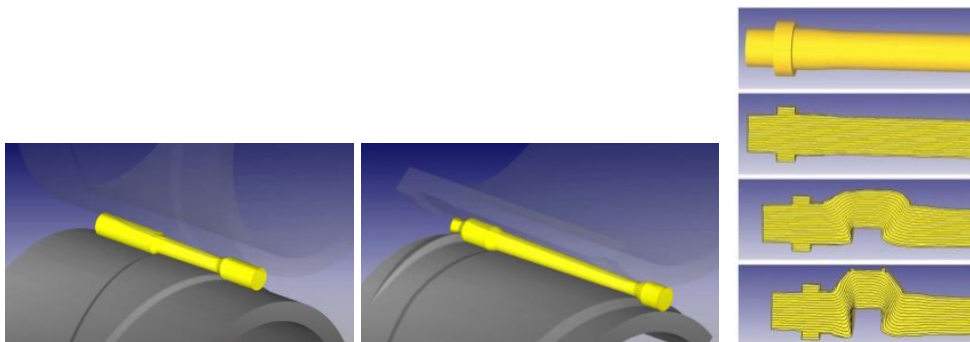
### 4.6.3 РОТАЦИОНО КОВАЊЕ

Ротационо ковање представља синоним за масовну и серијску производњу која пружа посебне могућности обликовања. Ротирајући профилни ваљци дају могућност обликовања било по дужини или попречно (клинасто) процесом топлог ковања (Слика 4-55). Ове технологије обликовања материјала могу се тумачити и као процеси ваљања, али с обзиром на то да се попречни пресек мења на врло малим дужинама, сврставање у групу тзв. ротационог ковања је оправдана.



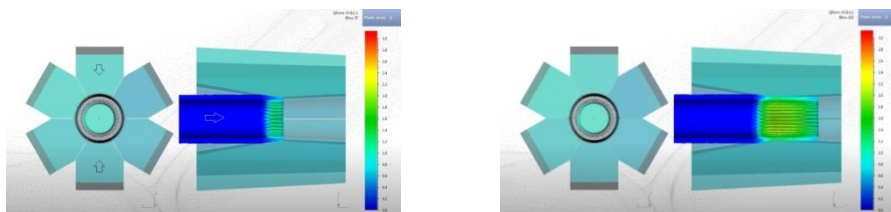
**Слика 4-55** Приказ ротационог уздужног ковања (QForm CAE/CAM софтвер).

Технологија ротационог попречног (клинастог) ковања (Слика 4-56) има велике предности, најпре у погледу брзине обраде, али и у погледу осигурања добрих механичких карактеристика готовог производа. Увек када се од дела захтева велика механичка носивост у условима великих динамичких оптерећења, обично се тражи технолошки поступак израде тих делова који ће осигурати непрекидност кристалне решетке материјала и повећану чврстоћу (пластична деформација ковањем је обично први избор).



**Слика 4-56** Ротационо попречно ковање (QForm CAE/CAM софтвер).

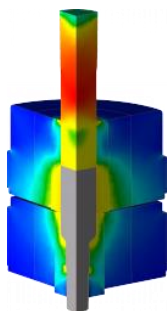
Поред ротационог ковања, у пракси се све чешће среће и радијално ковање, посебно за случајеве спољашњих озубљења вратила. Ова врста операција обраде се изводи на специјализованим машинама на којима се, услед поступног кретања алата у радијалном правцу, врши „утискивање” облика зубаца на вратилу које пролази кроз алат (Слика 4-57). Делимични захват алата и припремка гарантује постепени процес утискивања профила зуба по пројектованој дужини озубљеног вратила.



**Слика 4-57** Приказ нумеричке симулације операције радијалног ковања спољашњег озубљења на вратило у CAE/CAM софтверу QForm.

#### 4.6.4 ХЛАДНО КОВАЊЕ У ЗАТВОРЕНОМ АЛАТУ

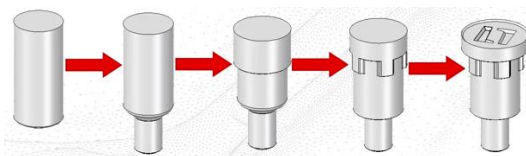
За разлику од топлог ковања, технологијама хладног ковања на температури околине, добијају се тачније димензије готовог дела, за који је потребна врло мала или никаква додатна машинска обрада. Поред хладног ковања, врло су сличне и технологије хладног истискивања, технологије орбиталног ковања, утискивања, хладног ваљања навоја и сл. За хладно ковање се користе специјални деформабилни материјали који омогућавају пластичну деформацију без лома. За прецизну нумеричку анализу и FEM симулацију хладног обликовања (методом коначних елемената) потребно је користити реолошке моделе материјала који су тестирани на температурама хладног ковања (од 20 – 400°C). Почетак пластичне деформације је на температури околине. Услед ослобађања велике количине топлоте, током одвијања ових операција обликовања (с обзиром да се ради о изразито неповратним процесима), коначни облик може да буде формиран уз достизање врло високе температуре у материјалу.



**Слика 4-58** Приказ симулације операције хладног ковања у алату са праћењем унутрашњих напона, деформација и температуре у компонентама алата и изгледа готових делова добијени овим технолошким поступком.

С обзиром на то да су код ових технолошких операција присутне велике деформационе силе за обликовање припремка, еластичне деформације делова алата нису занемарљиве (Слика 4-58). Компоненте алата

се због тога посматрају као деформабилна тела на којима се прате еластичне деформације услед појаве унутрашњих напона и до  $\sigma_v = 1600$  (N/mm<sup>2</sup>). Код ових алата се најчешће захтева да компоненте (матрице, конструктивни прстенови) буду супротно преднапрегнуте, како би се у току оптерећења достигло нулто оптерећење. Компоненте алата у непосредном контакту са припремком, такође, трпе велика термичка напрезања и хабања које треба предвидети у експлоатационом циклусу. Из тог разлога, потребно је спровести детаљне нумеричке анализе и симулације обраде у *CAE/CAM* софтверу. Са становишта израдака (делова) који се добијају овом обрадом, такође, постоји потреба за детаљном анализом промене облика током процеса. Уколико се део, који се добија хладним ковањем, трајно деформише са превеликим степеном деформисања, врло често се јавља појава спољашњег, видљивог лома на површини готовог дела или невидљивих пукотина у структури материјала, а које се у експлоатацији могу проширити и учинити део неупотребљивим. Да би се предупредиле појаве лома делова при хладном ковању, *CAE/CAM* апликације обично нуде збирку уграђених модела материјала, теоријских и емпиријски утврђених модела деформације и критеријума који помажу нумеричкој анализи хладног обликовања методом коначних елемената да врло веродостојно симулира реалан процес деформације. Коефицијент трења код хладног обликовања мора да буде са што нижом вредношћу, јер се тиме омогућава неометано пластично течење преко радних површина алата које се одликују врло високим квалитетом (брушене и полиране површине). Велики број истраживања посвећен је управо одређивању достигнутог коефицијента трења и његовој промени у току процеса пластичног деформисања.

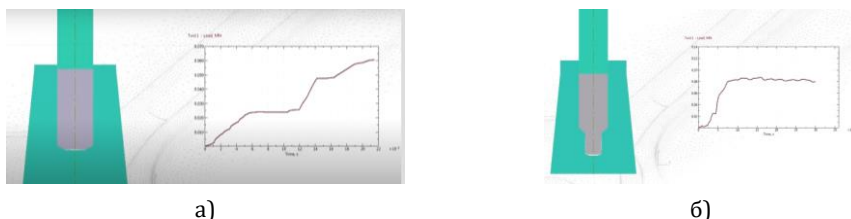


**Слика 4-59** Симулација геометрије обратка по обављеним захватима хладног ковања у QForm *CAE/CAM* софтверу.

Као илустрација модела операције хладног обликовања приказан је готов део (Слика 4-59), и пример цилиндричног припремка (димензије  $\varnothing 8.7 \times 20$  мм, челик AISI 1010) који се, хладним ковањем у пет операција (захвата), трансформише у готов део са променљивим пречником и карактеристичном главом, са утиснутим детаљима на горњој површини.

Прву технолошку операцију (Слика 4-60) представља предобликовање припремка ( $\varnothing 8.0$  mm), како би се добила задовољавајућа

микроструктура и потребан напон течења  $K_0$  за наредне операције (захвате) хладног ковања. Материјал алата је челик AISI H13.



Слика 4-60 Предобликовање и друга технолошка операција ковања.

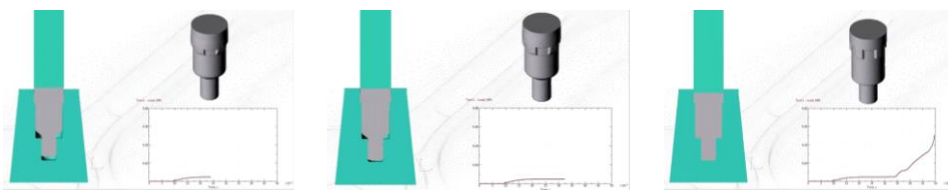
Другу операцију обраде представља хладно ковање ради добијања цилиндричног облика најмањег пречника (4,5mm) на дну готовог дела (Слика 4-60 -б). Пре саме испуне алата, деформациона сила има готово константну вредност да би, по достизању дна алата, деформациона сила почела нагло да расте, када је потребно заустављање горњег дела алата како не би настала његова трајна оштећења.

У трећој операцији обраде (Слика 4-61), након замене дела алата у горњем делу, формира се глава на врху припремка са повећаним пречником чиме се припрема за утискивање карактеристичних детаља у наредном алату.



Слика 4-61 Трећа технолошка операција са променом деформационе силе.<sup>18</sup>

У четвртој технолошкој операцији (Слика 4-62) добија се карактеристични облик главе са детаљима при релативно малој деформационој сили.

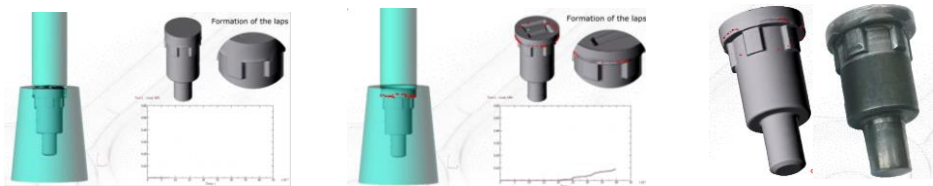


Слика 4-62 Четврта технолошка операција и промена деформационе силе.<sup>19</sup>

<sup>18</sup> [www.qform3d.com](http://www.qform3d.com)

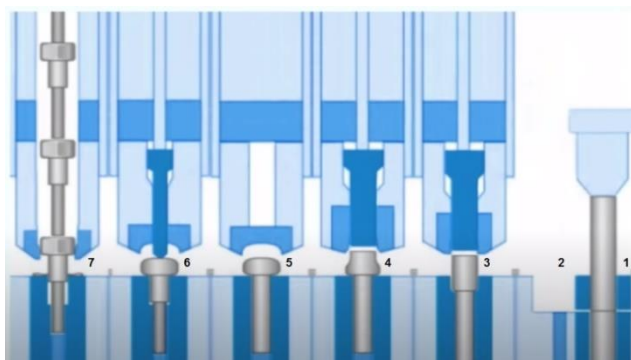
<sup>19</sup> [www.qform3d.com](http://www.qform3d.com)

У последњој, петој, технолошкој операцији (Слика 4-63) утискује се карактеристичан детаљ на горњој површини. По обављеној симулацији деформације, у *CAE/CAM* апликацији је могуће утврдити места са могућим оштећењима готовог дела уколико дође до прекорачења хода горњег дела алата.



**Слика 4-63** Пета технолошка операција.

Врло сличан машински елемент који захтева хладно ковање је вијак. Ради се о машинском елементу који има широку употребу и који се, због тога, обично производи у великом броју (великим серијама). То је и разлог због којег треба моделирати аутоматизован технолошки поступак производње у коме се подразумева непрекидан транспорт обратка (отковка) између технолошких операција хладног ковања главе вијка (Слика 4-64) како би се постигла конкурентна цена на тржишту. Припремак је жица пречника 2mm до 6mm, дужине до 75mm, дужина избацивача на страни матрице до 70mm, са максималним бројем израђених комада 400 у минути.

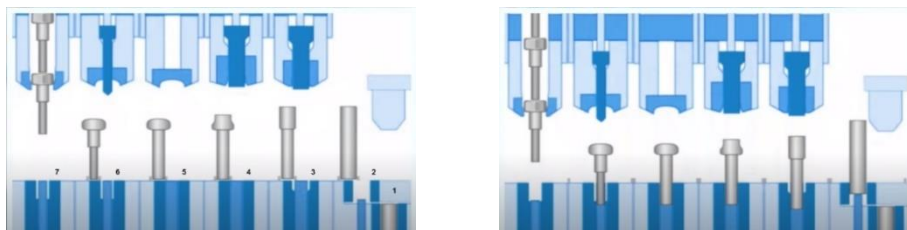


**Слика 4-64** Приказ модела операције хладног ковања тела и главе вијка поређаних по сукцесивним захватима (секвенцама).

На позицији 1 аутоматизоване линије имамо одсецање припремка пројектоване дужине (чисто смицање) који се пребацује на позицију 2 где се избацивачем доводи на линију хладног ковања главе вијка. На позицији 3 имамо прву технолошку операцију ковања главе вијка да би се затим на позицији 4 остварио највећи степен деформације. Позиција 5 представља формирање горње површине главе вијка на којој ће, према

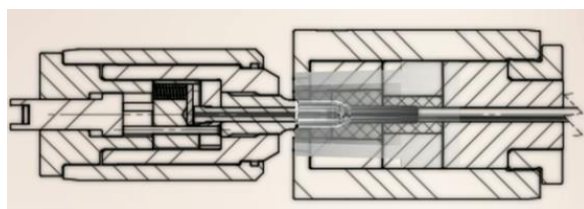


потреби, на позицији 6 утиснути додатни пројектован профил унутар главе вијка. Позиција 7 на аутоматизованој линији представља транспорт готовог вијка. Приказ рада сукцесивних алата даје још бољи увид у комплексност ове технологије (Слика 4-65).



**Слика 4-65** Приказ линије за израду тела и главе вијка хладним ковањем.

3D CAD модел геометрије припремка, обратка и скупа алата са свим њиховим деловима, као и приказ кретања покретних делова алата са симулацијом сукцесивних операција деформисања, пружају инжењеру могућност да сагледа све детаље поступка и антиципира могуће недостатке на самом почетку моделирања технолошког поступка. Поред тискача и матрице који су у директном контакту са материјалом припремка, ту су и делови алата који омогућавају одвијање сукцесивних операција деформисања и анулирања великих напона у зидовима алата. Модел операције је изведен у једној операцији одсецања и шест узастопних операција пластичне деформације хладног ковања.



**Слика 4-66** Приказ технологије хладног ковања.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> [www.femsa.cat](http://www.femsa.cat)

## Литература

- Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (2004). *Cold and hot forging: Fundamentals and applications*. ASM International. ISBN: 0-87170-805-1
- Bergmann W. (2008). *Werkstofftechnik, Teil 1 und Teil 2*. Carl HANSER Verlag, Munich/Vienna. ISBN 978-3-446-43536-0.
- Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani P. F., Brosius, A., Cao, J., Ghiotti, A., Khraisheh, M., Merklein, M., & Tekkaya A. E. (2014). Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals*, 63(2), 727-749. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.005>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach* (4th ed.). Wiley.
- Davis, J. R., & Semiatin, S. L. (1998). *Metals handbook: Forming and forging* (vol. 14). ASM international.
- Gharehchahi, H., Kazemzadeh-Parsi, M. J., Afsari, A., & Mohammadi, M. (2021). Blank shape optimization in the deep drawing process by sun method. *Production Engineering*, 15, 735-750. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01049-z>
- Hora, P. (2015). Advanced constitutive models in sheet metal forming, 8th Forming Technology Forum Zurich, Proceedings, pp. 182, June 29-30.
- Hora, P. (2011). Zero Failure Production Methods, Proceedings, 4th Forming Technology Forum Zurich, pp. 169, May 17th -18th.
- Hu, P., Ying, L., & He, B. (2017). *Hot stamping advanced manufacturing technology of lightweight car body*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2401-6>
- Hwaiyu, G. (2004). *Manufacturing engineering handbook* (1st ed.), McGraw-Hill, pp.1193, 2004. ISBN 978-0071398251
- Marciniak, Z., Duncan, J. L., & Hu, S. J. (2002). *Mechanics of sheet metal forming* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 0 7506 5300 0
- Milutinović, M., & Kraišnik, M. (2019). *Nekonvencionalni postupci obrade plastičnim deformisanjem* (Vol. 775). Факултет техничких наука, Универзитета у Новом Саду. ISBN: 978-86-6022-158-4
- Neto, E. A. D. S., Perić, Đ., & Owen, D. R. J. (2008). *Computational methods for plasticity: Theory and applications*. WILEY. ISBN: 978-0-470-69452-7
- Plančak, M., Vilotić, D. (2011). *Alati za tehnologije plastičnog deformisanja metala*. Факултет техничких наука, Универзитета у Новом Саду.
- Raabe, D. (1998). *Computational materials science: The simulation of materials microstructures and properties* (1st ed.). WILEY-VCH. ISBN: 978-3527295418
- Randelović, S., & Marinković, V. (2017). *Proizvodne tehnologije*. Машински факултет, Универзитета у Нишу. ISBN 978-86-6055-096-7
- Randelović, S. (2006) *Modeliranje procesa istosmernog istiskivanja šupljih elemenata koji obezbeđuje visoku sposobnost procesa* [Докторска дисертација, Машински факултет, Универзитета у Нишу].
- Saxén, A. (2014). *High Performance Optimization on Cloud for a Metal Process Model* [Докторска дисертација, Uppsala University]. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-228088>
- Vilotić, D., & Plančak, M. (2010) *Mašine za obradu deformisanjem krivajne prese*. Факултет техничких наука, Универзитета у Новом Саду. ISBN 978-86-7892-275-6

Zaid, H. M., Ihsan, K. I., & Ahmed, K. A. (2020) Optimization of initial blank shape for flexible micro deep drawing of square parts, *Materials Today: Proceedings*, 20(4), 555-559. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.188>

# 5 МОДЕЛИРАЊЕ ОПЕРАЦИЈА АДИТИВНИХ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА

---

- 5.1 Кратак преглед историје 3D штампе
  - 5.2 Адитивни производни процес
  - 5.3 Рачунарске апликације за моделирање адитивне производње
    - 5.3.1 *CAPP/CAM* рачунарске програмске апликације за FDM
    - 5.3.2 *CAPP/CAM* рачунарске програмске апликације за технолошке поступке израде фотополимерзацијом
    - 5.3.3 Одлике софтвера за моделирање FFF/ FDM процеса адитивне производње
- Литература



Адитивна производња - АП је одредница која означава читав низ технолошких поступака који омогућавају израду физичких објеката додавањем материјала у слојевима (слој по слој), користећи као улаз 3D дигитални CAD геометријски модел<sup>1</sup>. Највећа предност адитивних производних процеса у односу на друге огледа се у могућности израде сложених геометрија, које је веома тешко или немогуће изградити конвенционалним технологијама. Данас су, у највећем броју случајева, у употреби два термина и то *3D Printing* (3D штампање), који је заступљенији у лаичкој литератури и *Additive Manufacturing* (адитивна производња), који се чешће користи у стручној литератури. У суштини, може се сматрати да се ради о синонимима, с тим да се *Additive Manufacturing* користи углавном када се жели бити технички прецизнији и процесе адитивних технологија, које нису технолошки сродне процесима „наношења“ материјала у слојевима (нпр. синтеровање материјала ласерским зраком по слојевима), обухватити једним термином. Такође, постоји тумачење да се одредница *Additive Manufacturing* користи онда када се жели нагласити да је извесни адитивни производни поступак индустријског нивоа квалитета.

## 5.1 КРАТАК ПРЕГЛЕД ИСТОРИЈЕ 3D ШТАМПЕ

Комерцијална употреба адитивне технологије, односно *Rapid Prototyping*-а, како се то тада звало, започета је 1987. године када је компанија 3D Systems произвела и комерцијализовала прву АП машину на свету, 3D штампач *SLA-1 (StereoLithography Apparatus)*, која је користила процес стереолитографије у коме се течни фотосензитивни полимер нанесен у танком слоју очвршћава помоћу UV ласера.

Током наредних година развијен је читав низ нових адитивних технолошких поступака. Истовремено са развојем технологија, појавиле су се бројне компаније које су избациле на тржиште нове 3D штампаче - како за индивидуалну, тако и за професионалну, а касније и индустријску употребу. Тако су се, у периоду од 1988. до 1995. године, појавиле компаније попут: DTM са машинама за *SLS (Selective Laser Sintering)*, Stratasys са 3D штампачима са *FDM (Fused Deposition Modeling)* технологијом, а у Европи, EOS GmbH (*SLS*, а касније и *DMLS Direct Metal Laser*

---

<sup>1</sup> Поред скраћенице АМ, која означава *Additive Manufacturing*, у стручној и лаичкој литератури се налазе и друге скраћенице попут: АТ- *Additive Technologies*, АМТ- *Additive Manufacturing Technologies*, 3D *Printing*, РР- *Rapid Prototyping* и SFF - *Solid Freeform Fabrication*.

*Sintering*). Z Corp је, искористивши патент MIT<sup>2</sup> за *inkjet* штампање, избацила на тржиште први штампач који користи технологију *Binder jetting*, а Sanders Prototype представља прве штампаче који користе восак као материјал за израду калупа на основу CAD модела. Након 1997. појављују се Arcam са јединственом *EBM (Electron Beam Melting)* технологијом, као и Object која је представила *Polyjet* технологију. Штампанем првог скафолда за јетру, постигнуто је прво значајно достигнуће примене 3D штампања у медицини, које се наставља првом штампом органа (првог минијатурног бубрега). Огроман број истраживања у области биоинжењеринга се наставља до данашњих дана. У овом периоду се појављује и Envisiontech са својим штампачима који се увелико користе у индустрији накита, биоинжењерингу и стоматологији.

2005. година је била прекретница за технологију 3D штампања, захваљујући успону иницијативе *open source code* (софтвера отвореног кода) под називом RepRap пројект. Његов циљ је био да користи 3D штампаче за производњу више нових 3D штампача, стварајући тако машине које се самореплицирају. Резултат је био 3D штампач под називом RepRap, који је од тог тренутка постао узор за практично сваки успешан јефтин 3D штампач који се појавио у наредном периоду. RepRap 3D штампач користио је најјефтинију *FDM/FFF* технологију и био је направљен од много пластичних делова који се могу одштампати на самом RepRap штампачу. То значи да сваки власник RepRap-а може да одштампа другог 3D штампач – дакле он је „самореплицирајући”. Пошто је био отвореног кода, учинио је технологију 3D штампања доступном практично свакоме ко има рачунар. Успех RepRap пројекта био је генератор (покретач, окидач) за успон комерцијалних 3D штампача. Тако се, поред скупих индустријских и професионалних 3D штампача великих произвођача, на тржишту појавио велики број компанија са десктоп штампачима за персоналну и професионалну употребу, као и за едукацију, а који су, по ценама, постали комерцијално доступни великом броју људи. *FDM/FFF* технологија је постала једна од најзаступљенијих технологија, али се у овој класи појављују и 3D штампачи који користе друге адитивне технологије (*SLA, SLS* и др.). Први десктоп *SLA* штампач представио је Formlabs 2011. године.

Појавом нових и унапређењем постојећих адитивних производних процеса, затим појавом нових машина (штампача), као и развојем читавог спектра нових материјала, софтвера и контролера, захтеви корисника су постајали све већи и фокус пажње се преместио са система за изра-

---

<sup>2</sup> Massachusetts Institute of Technology (Технолошки институт у Масачусетсу)



ду прототипова на производњу. Заправо, израда финалних производа је постала највећи изазов за већину произвођача машина АП. За израду делова и структура на АП машинама („3D штампачима“) данас се могу користити готово све класе инжењерских материјала, као што су метали, пластика, керамика, затим нетрадиционални материјали и разни биоматеријали. Адитивни поступци израде су ушли у готово све гране индустрије и све сфере живота - од инжењерства, ваздухопловства, медицине, стоматологије, па до прехранбене индустрије и др. Појавили су се и 3D штампачи који су намењени тачно одређеној грани индустрије. Развој и напредак у области АП пратио је и појаву нових и развој постојећих *CAD* и *CAM* софтверских пакета који су омогућили контролу и унапређење готово свих корака у процесу АП и, као крајњи циљ, израду квалитетнијих и економичних делова.

## 5.2 АДИТИВНИ ПРОИЗВОДНИ ПРОЦЕС

Теоријски гледано, адитивни поступци израде пружају неограничену слободу у моделирању геометрије делова које треба изградити. Ипак, у пракси то често није потпуно тачно, односно постоје одређена ограничења у том погледу и та ограничења се разликују у зависности од адитивне технологије којом се треба изградити део жељене геометрије. Процеси 3D штампања нису тако једноставни и не подразумевају само „учитавање“ 3D модела у  $UJ^3$  штампача и „пуштање објекта на штампу“. У процесу адитивне производње потребно је више међукорака до добијања финалног производа. На самом почетку спровођења процеса адитивне производње обавља се анализа валидности *CAD* модела у погледу могућности израде на АП машини. Затим, уколико постоје недостаци у геометрији који узрокују немогућност његове израде, следи његово „оздрављење“, а потом и оптимизација одлика модела спрам ограничења које адитивна технологија доноси<sup>4</sup>. У следећем кораку врши се избор одговарајућих параметара, којима се контролише процес и третирање материјала. У последњој етапи, врши се симулација и анимација адитивног процеса и генерисање извршног програм са инструкцијама за „3D штампу“ (нпр. у ISO 6983 формату, тј. у виду G-кода). Такође, постоји низ додатних активности и међукорака који могу у великој мери да утичу на квалитет израђеног дела, а у неким случајевима и на могућност израде.

---

<sup>3</sup> УЈ је акроним за управљачку јединицу машине за АП која је, заправо, у погледу рачунарске архитектуре, најчешће уобичајени персонални рачунар.

<sup>4</sup> Оптимизација се најчешће односи на геометрију дела и његову оријентацију у комори за израду.

Кораци једног адитивног производног процеса приказани су на слици (Слика 5-1).



Слика 5-1 Кораци адитивног производног процеса.

### 5.3 РАЧУНАРСКЕ АПЛИКАЦИЈЕ ЗА МОДЕЛИРАЊЕ АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

Као што постоје одговарајуће *CAPP/CAM* рачунарске апликације за моделирање технолошких поступака, операција и захвата у области обраде резања и деформисања, постоје и одговарајућа софтверска решења која су намењена моделирању процеса АП.

У зависности од типа АТ, као и произвођача машина за АП, постоји велики број комерцијалних софтверских пакета који су намењени планирању технолошког процеса адитивне производње.

Произвођачи *НУ машина за адитивну производњу*<sup>5</sup> које примењују сложеније адитивне технологије попут *SLS, SLM, EBM* и бризгање везива захтевају коришћење посебно развијене *CAPP/CAM* софтвере који се инсталирају искључиво на управљачким јединицама тих машина (*властички* или *системски* софтвери). Многи од њих имају сарадњу са познатим софтверским компанијама које израђују софтвере за АП процесе, али су такви софтвери специјализовани искључиво за њихове штампаче. Обично, код ове врсте апликација, велики број параметара процеса није могуће мењати (закључан је од стране произвођача АП система). Из тог разлога, системске *CAPP/CAM* апликације не пружају могућност истраживања и детаљну анализу функција.

На другој страни, други произвођачи користе интегрисане *CAPP/CAM* рачунарске апликације које омогућавају контролу свих аспеката АП процеса од припреме, оптимизације до производње, па и накнадне обраде. У овим *CAPP/CAM* апликацијама се након учитавања модела може вршити позиционирање и модификација модела, оптимизација, израда носећих структура, симулација израде, подешавање одлика штампања, начина скенирања<sup>6</sup>, чак и моделирање процеса накнадне обраде и сл. На пример, компанија Materialise нуди читав пакет различитих рачунарских апликација које су намењене скоро свим адитивним технологијама, укључујући и *3D Slicer*<sup>7</sup> под називом Magics. Овај софтвер се може надоградити различитим постпроцесорима који могу створити одговарајућу датотеку извршног програма у формату, који је прилагођен машинама које примењују различите адитивне процесе, укључујући и машине за израду делова од метала (Arcam, GE Concept Laser) и машине за бризгање материјала (HP). Такође, на тржишту се могу наћи и *CAPP/CAM* апликације које су специјализоване за одређене врсте адитивних технологија (нпр. за *FDM*), а које се могу користити за рад са различитим „десктоп“, персоналним и професионалним машинама које примењују ту врсту АТ. За сваку од ових апликација постоји листа штампача са којима је могуће радити (листа компатибилности). Ове апликације су, у домену, познате под називом *3D Slicer*-и. Иако овакве рачунарске програмске апликације нису стриктно категорисане као *CAPP/CAM* софтвери, оне заправо обављају исту функцију – у њима се моделира и симули-

---

<sup>5</sup> НУМАП – надаље ће се у тексту можда наћи ова скраћеница коју ћемо користити да означимо нумерички управљане машине за адитивну производњу (колоквијално „3D штампаче“).

<sup>6</sup> „Скенирање” је одредница која, у контексту *CAPP/CAM* апликација за АП, означава релативно кретање алата („главе” НУМАП) и обратка, тј. радног стола.

<sup>7</sup> У контексту АП, класа *CAPP/CAM* апликација се често називају *3D Slicer* или само *Slicer* апликације.

ра комплетан технолошки поступак, односно операције и захвати, који су инхерентни одговарајућој адитивној технологији. Такође, као резултат моделирања операција, добија се датотека која садржи извршне инструкције за контролу рада НУМАП, односно извршни програм који је у већини случајева у виду G-кода.

Примери *CAPP/CAM* апликација, које користе неки од најпознатијих произвођача НУМАП у зависности од материјала, намене и врсте примењене адитивне технологије, дати су у табели Табела 5-1.

**Табела 5-1** Произвођачи НУМАП, адитивне технологије и системски и компатибилни *CAPP/CAM* софтвери.

Произвођач	Технологије	<i>CAPP/CAM</i> софтвер
<b><i>EOS</i></b>	SLS, DMLS	EOSINT 2, EOS Parameter Editor, EOSSTATE, EOS CONNECT, Materialise Magics Metal Package
<b><i>3DSystems</i></b>	SLA SLM/DMLS	Manufacturing OS 3DXpert (metal systems) Amphyon D2P (Dicom to Print) <i>3D Sprint</i> (Plastic AP Software) 3D Connect. DMP Software Suite DMP DEntal
<b><i>Stratasys Limited</i></b>	FDM PolyJet Stereolithography P3 SAF	GrabCad software solutions GrabCad Print, Insight, Control Center, MT Connect Intuitive Titanium TM software
<b><i>General Electric</i></b>	DMLM, Binder Jet, EBM	AMP software
<b><i>The ExOne</i></b>	Sand METAL Binder jetting	Live Sinter Fabricate MFG Fabricate Live Parts
<b><i>Hewlett Packard (HP)</i></b>	Multi jet fusion Metal fusion	3D API2 3D Center1 3D Process Control SmartStream AP 3D Build Manager Build Processor
<b><i>SLM Solutions</i></b>	SLM	SLM Build Processor

### 5.3.1 *CAPP/CAM* РАЧУНАРСКЕ ПРОГРАМСКЕ АПЛИКАЦИЈЕ ЗА FDM

FDM<sup>8</sup> је технологија адитивне производње код које се материјал, који је најчешће у виду жице која је намотана на котур, доводи до тзв. *екструзионе главе* или *млазнице* која га топи и екструдира (истискује) на радну површину. У највећем броју конструкционих извођења ових машина, глава штампача се креће у два управна хоризонтална правца (X и Y), а радни сто са подлогом се креће у вертикалном правцу (Z). Израда дела се одвија тако што се филамент (жица) материјала топи у комори пред млазницом и потом, тако растопљен, истискује кроз млазницу и наноси на радну подлогу према утврђеној путањи релативног кретања главе млазнице и радног стола, градећи на тај начин један хоризонтални слој запремине дела који се израђује. Након екструдирања, растопљени материјал се контролисано хлади и очвршћава и истовремено спаја за осталим, околним истиснутим материјалом (у хоризонталној равни), али и материјалом у следећем слоју, градећи тако чврсти део из слојева. Ово је једна од најзаступљенијих технологија, првенствено због приступачности цене машина и материјала, али и због релативно једноставне контроле самог процеса израде.

*CAPP/CAM* апликације за моделирање *FDM* операција имају више функција, о чему ће се касније детаљно говорити. Укратко, након подешавања одлика 3D *CAD* модела, затим параметара рада машине и третмана материјала, као и одлика самог процеса, врши се формирање путање релативног кретања млазнице и радног стола и симулација процеса. На крају се генерише извршни програм у виду G-кода која се, затим, отправља ка *FDM* машини. Постоји велики број *CAPP/CAM* апликација за *FDM/FFF*, од којих су многе бесплатне. Зато ће се у овом поглављу улога ових специфичних софтвера код планирања процеса адитивне производње анализирати детаљније на примеру софтвера који су првенствено намењени за *FDM/FFF* штампаче и који су доступни за анализу и коришћење. Неки од ових софтвера дати су у табели: Табела 5-2.

---

<sup>8</sup> FDM - Fused Deposition Modeling (или FFF - Fused Filament Fabrication)

**Табела 5-2** Најчешће коришћени софтвери за планирање процеса адитивне производње код FFF/FDM штампача.

Софтвер	Корисници	Цена	OS
<b>Ultimaker Cura</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан, Професионални \$50/месечно, Excellence \$1,000/месечно	Windows, Mac, Linux
<b>Simplify3D</b>	Почетници, Напредни	\$149	Windows, Mac
<b>PrusaSlicer</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан	Windows, Mac, Linux
<b>OctoPrint</b>	Средње напредни, Напредни	Бесплатан	Raspberry Pi, Windows, Mac Linux
<b>Astroprint</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан, Pro \$9.90/месечно	Browser, Raspberry Pi, pcDuino
<b>ChiTuBox</b>	Почетници до професионалаца	Бесплатан, Pro \$169/год.	Windows, MacOS, Linux
<b>Netfabb</b>	Средње напредни, Напредни	Стандард \$230/год., Premium \$4,870/год.	Windows
<b>Slic3r</b>	Напредни, Професионалци	Бесплатан	Windows, Mac, Linux
<b>IceSL</b>	Напредни	Бесплатан	Windows, Linux
<b>MatterControl</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан	Windows, Mac, Linux
<b>Repetier</b>	Средње напредни, Напредни	Бесплатан	Windows, Mac, Linux
<b>CraftWare Pro</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан, Premium \$99.99/год. Enterprise \$499.99/год.	Windows, Mac, Linux
<b>IdeaMaker</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан	Windows, Mac, Linux
<b>Z-SUITE</b>	Почетници	Бесплатан	Windows, Mac
<b>MakerBot Print</b>	Почетници	Бесплатан	Windows, Mac
<b>SelfCAD</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан пробни период, \$14.99/месечно	Browser
<b>3DPrinterOS</b>	Напредни, Професионалци	Freemium	Browser, Windows, Mac
<b>KISSlicer</b>	Почетници, Напредни	Бесплатан, Pro \$35, Premium \$40	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pi
<b>Tinkerine Cloud</b>	Почетници, Искусници, Напредни	Бесплатан	Browser
<b>SuperSlicer</b>	Напредни	Бесплатан	Windows, MacOS, Linux

### 5.3.2 *CAPP/CAM* РАЧУНАРСКЕ ПРОГРАМСКЕ АПЛИКАЦИЈЕ ЗА ТЕХНОЛОШКЕ ПОСТУПКЕ ИЗРАДЕ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈОМ

SLA– стереолитографија је први патентирани и комерцијализовани процес адитивне производње који, према начину грађења 3D објекта, припада категорији очвршћавања сукцесивних слојева фотосензитивне течне смоле (у посуди<sup>9</sup>) полимеризацијом која се активира усмереном ултравиолетном светлошћу. Уско фокусирано електромагнетно зрачење одређене таласне дужине, која активира процес полимеризације молекула смоле, циља оне области површинског слоја<sup>10</sup> течне смоле, које желе да полимеризује (очврсне) и претвори у део (слој) структуре дела. Када се заврши очвршћавање области површинског слоја смоле чија је геометрија одређена контуром попречног пресека учитаног 3D модела дела за тај слој, платформа се помера наниже за дефинисану висину слоја како би се омогућило да свежа течна смола формира нови слој и крене очвршћавање тог слоја и „повеже” са већ полимеризованим слојем испод. Тако се поступак понавља слој по слој док се не изради цела запремина 3D дела.

Код ове технике 3D штампања, релативно кретање радног стола и оптичког система је знатно мање у поређењу са FDM технологијом. Заправо, оптички систем конвенционалних („праве”) SLA штампача, користи покретно огледало за усмеравање UV ласерског зрака на смолу и тако исцртава контуру и област попречног пресека за одговарајући слој. Код DLP<sup>11</sup> и MSLA<sup>12</sup> система извори светлости су растеризоване UV лампе (UV LED диоде) чији елементарни делови врше осветљавања непосредно испод и једино кретање је кретање радне платформе, која се креће искључиво дуж Z-осе током целог процеса штампања.

Једна од битних разлика у односу на FDM процес штампања је у томе што штампачи за смоле не користе извршни код у виду G-кода (или APT). У ствари, већина 3D штампача који се базирају на методама полимеризације фотосензитивних течних смола у посуди (SLA/DLP/MSLA), за записивање извршних инструкција користи свој сопствени формат, а самим тим и сопствену (власничку) рачунарску програмску апликацију за формирање слојева (*Slicer app* или *Slicer* програмски модул). Ипак, треба знати да постоје и независне *Slicer* апликације које дају веће могућности подешавања у односу на *Slicer* модуле, који су иницијално

---

<sup>9</sup> „Vat” polymerization – „ват” полимеризација или полимеризација течне смоле у посуди.

<sup>10</sup> Област површинског слоја је у геометријском погледу заправо скуп тачака (малих, елементарних, кружних области) на површинском слоју смоле.

<sup>11</sup> DLP - Digital Light Processing.

<sup>12</sup> MSLA - Masked Stereolithography Apparatus.



инсталирани у рачунаре за контролу рада штампача и који су, истовремено, компатибилни са многим „десктоп” штампачима који користе методе полимеризације смола.

Параметри спровођења процеса код ових технологија се разликују у односу на FDM. Уместо температуре млазнице или хлађења, подешавања штампе код смоле укључују друге параметре попут: времена излагања извору светлости и брзине померања радне платформе, затим параметре у вези са израдом шупљих делова објеката (*part hollowing*) и постављања одводних отвора (*drain hole placing*) и др. Међутим, манипулације моделом попут оријентације, позиционирања модела, скалирања, као и параметри висине слоја и додела носећих структуре, такође су присутне у софтверима за моделирање процеса полимеризације смоле, баш као и у већини технологија 3D штампања. Зависно од сложености софтвера, неки нуде и напредније функције, тј. различите начине испуне, могућности оздрављење модела, детекцију танких зидова и сл. Неки од њих су у широкој употреби у специфичним областима, као на пример Formware у стоматологији и изради накита, која има могућности за подешавање низа параметара који су специфични за процесе израде делова накита или денталних производа. Професионалне (комерцијално доступне) верзије појединих софтвера нуде могућност подешавања и контроле већег броја параметара и неке додатне функције манипулације моделима.

Листа најчешће коришћених софтвера који су предвиђени за штампаче које користе методе фотополимеризације течних смола дата је у табели: Табела 5-3.

**Табела 5-3** Најчешће коришћени софтвери за моделирање процеса адитивне производње на бази полимеризације течних смола.

Софтвер	Технологија	Цена	Оперативни систем рачунара за контролу рада машине
<b><i>ChiTuBox</i></b>	Смола	Бесплатан ~\$170/годишње за Pro верзију	Windows, MacOS, Linux
<b><i>Lychee Slicer</i></b>	Смола	Бесплатан, ~\$6/месечно за Pro верзију, ~\$10/месечно за Premium верзију	Windows, MacOS, Linux
<b><i>PrusaSlicer</i></b>	Смола, FDM	Бесплатан	Windows, MacOS, Linux

Софтвер	Технологија	Цена	Оперативни систем рачунара за контролу рада машине
<b>Z-Suite</b>	Смола, FDM	Бесплатан	Windows, MacOS,
<b>Photon Workshop</b>	Смола	Бесплатан	Windows, MacOS
<b>PreForm Formlabs</b>	Смола, SLS	Бесплатан	Windows, MacOS
<b>NanoDLP (web interface control)</b>	Смола	Бесплатан	Windows, MacOS, Linux, Raspberry Pi
<b>Formware 3D</b>	Смола, inkjet	~\$155 за личну лиценцу или ~\$360 комерцијалну лиценцу	Windows
<b>BuildBee</b>	Смола	~\$6 месечно	Windows, MacOS,

### 5.3.3 ОДЛИКЕ СОФТВЕРА ЗА МОДЕЛИРАЊЕ FFF/ FDM ПРОЦЕСА АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

Улазна датотека *CAPP/CAM* апликације за моделирање свих процеса адитивне производње, па и *FFF/FDM* је 3D геометријски модел објекта који се жели израдити, а који је моделиран у неком од *CAD* софтвера и трајно забележен у неком од формата који је читљив за *CAD* модуле ових апликација. Ти формати су најчешће \*.*stl*, \*.*3df*, \*.*obj*, а може бити и дат у неком од *step* формата (203, 214).

У првој фази поступка моделирања *FFF/FDM* процеса адитивне производње врши се припрема геометријског модела објекта који се жели „штампати” (израдити) - Слика 5-2. То обухвата:

1. оздрављење модела, што подразумева низ интервенција на мрежи тетраедарских елемената од којих је запремина објекта сачињена (*stl*); интервенције се најчешће односе на попуњавање неодговарајућих шупљина у запремини (нпр. насталих лошим „извозом” из изворног *CAD* формата у *step* или *stl* формат), или на оптимизацију мреже тетраедарских елемената (нпр. умањење или увећање димензија тетраедарских елемената спрам жељене резолуције, односно спрам жељеног одступања од идеалног облика - тачности);
2. манипулација моделом, што подразумева скалирање (најчешће увећање због накнадног скупљања материјала током хлађења), затим позиционирање и оријентисање дела у радној запремини коморе у потрази за оптималним местом спрам циљаних кључних показатеља учинка процеса (нпр. искоришћеност радне запремине коморе);
3. формирање носеће структуре;

4. подела запремине модела на коначан број слојева (*slicing*) уз подешавање дебљине слојева, односно резолуције штампе у вертикалном правцу.

У другој фази поступка моделирања *FFF/FDM* процеса адитивне производње врши се подешавање технолошких одлика процеса „штампе”. У овој фази се врши:

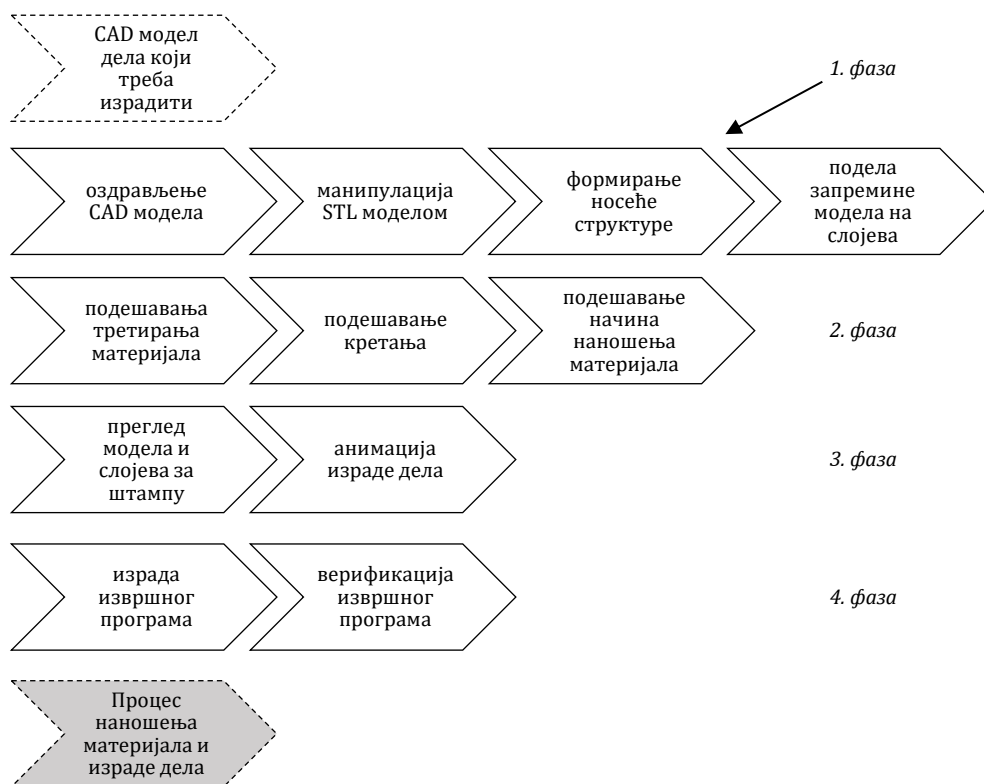
5. подешавања одлика третирања материјала у процесу штампе; у оквиру овог корака, обично се најпре учитају и подесе подаци о материјалу који ће се користити за штампу, а затим се врши подешавање температуре млазнице и радне површине (која може одступати од иницијално препоручених вредности за дати материјал у зависности од радног амбијента, карактеристике лота материјала и др.);
6. подешавање одлика релативног кретања млазнице и радне површине, што подразумева подешавање параметара брзине кретања стола у појединим правцима (X/Y), начина грађења *испуне* области између контура попречних пресека слојева, што непосредно утиче на стил „скенирања” (шрафирања) области, односно на релативну путању млазнице у односу на радни сто (у ове одлике спадају и одлике помоћних кретања – када се не наноси материјал већ, на пример, долази до прелаза са једне на другу област попречног пресека);
7. подешавање одлика наношења материјала (штампања) преко параметара брзина екструзије, затим параметара дозвољених очекиваних одступања (у X/Y и Z правцу) у односу на идеални облик дела и др.

У трећој фази врши се симулација и анимација процеса „штампе” и провера изводљивости и ваљаности процеса. То обично обухвата:

8. преглед датотека за штампање - целог модела и/или појединачних слојева;
9. анимација израде дела уз процену времена израде и количине употребљеног материјала, као и анализе и симулације могућих недостатака (нпр. витоперења услед заосталих напона уколико софтвер поседује *CAE* модул који, методом коначних елемената, обавља спрегнуту термичку и структуралну анализу).

У последњој, четвртој фази моделирања процеса врши се:

10. израда извршног програма (генерисање G-кôда) и
11. верификација изводљивости и ваљаности извршног програма, односно G-кôда.



Слика 5-2 Поступак моделирања FFF/ FDM процеса адитивне производње.

### 5.3.3.1 Интерфејс Slicer апликације

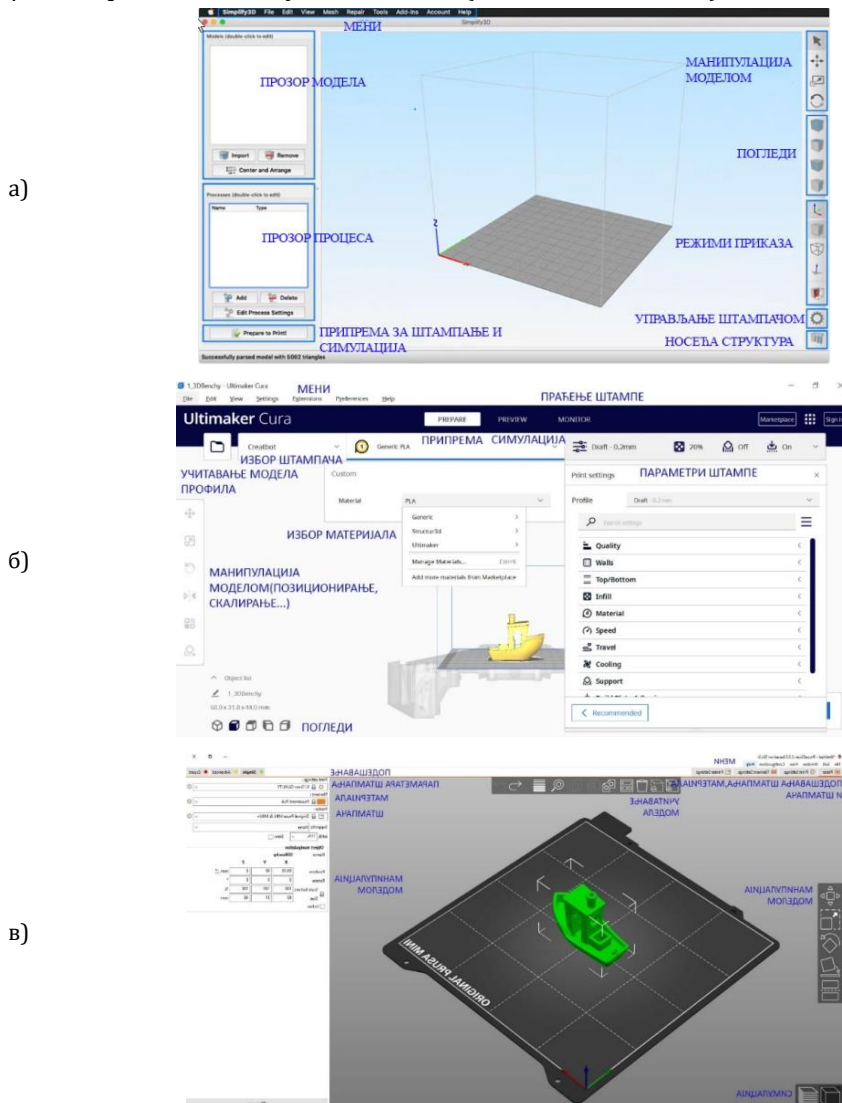
Иако се кориснички интерфејс сваког софтвера разликује, тј. има свој јединствени стил и своје специфичности, код свих софтвера овог типа постоје 3 кључна дела:

- **Графичка област** у оквиру које се визуелизује модел. У њој се врши визуализација равни радне површине штампача, облик, димензије, положај објекта у радном простору, графички приказ координатних система, разне манипулација моделом, оријентација, скалирање, распоред и позиционирање једног или више модела, налагање на радну површину, преглед дефинисаних слојева модела (кретање кроз сваки слој модела и контрола дефинисаних параметара у њима) и сл.
- **Панел са подешавањима** (*slicer settings panel*). У њему се налазе опције којима се контролишу технолошке одлике процеса, попут висине слоја, затим избор носећих и помоћних структура, врста и структура љуске, испуне, брзине штампе, температура

туре екструдера, хлађења и осталих о којима ће детаљно касније бити речи.

- **Мени опција са општим подешавањима** (*File and general settings*) Овај део интерфејса садржи алате за управљање увозом и извозом модела, подешавања приказа, подешавања укључивања и искључивања штампача, картица помоћи, опције опозива и понављања и сл.

Приказ интерфејса три различита софтвера за моделирање FFF/FDM процеса дати су на сликама (Слика 5-3 -а, -б, -в).



Слика 5-3 Примери интерфејса (а) Simplify 3D, (б) UltiMaker Cura и (в) PrusaSlicer софтвера.

### **5.3.3.2 Функције и подешавања софтвера за моделирање FFF/FDM процеса**

CAPP/CAM апликација за моделирање 3D штампе има три основне функције:

1. израда обрадне геометрије (читање *stl* датотеке односно формирање запремине модела и сечење те запремине на слојеве),
2. израда путање релативног кретања млазнице и радног стола са одговарајућим одликама процеса наношења материјала,
3. израда извршног програма (нпр. у виду G кода).

Три главна типа подешавања која се обављају у софтверу су:

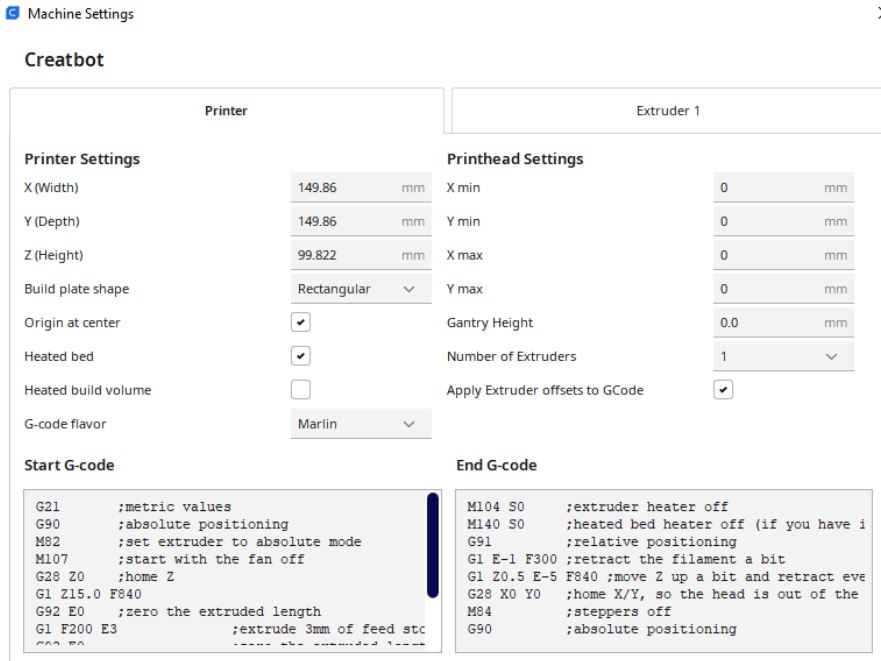
1. подешавања штампача (пречник млазнице, димензије радне површине, Z-offset, односно одстојање млазнице од радног слоја, врста фирмвера и сл.);
2. подешавања штампања, тј. технолошких одлика процеса: висине слојева, љуске модела, процента и шаре испуне, брзине израде и сл.;
3. подешавања материјала: пречник филамента, проток екструзије, температура екструдера, тј. млазнице и радне површине и др.).

#### **5.3.3.2.1 Подешавања штампача**

Подешавања штампача подразумевају избор адекватног штампача са понуђене листе, додавање новог штампача по избору са свим подешавањима параметара, тј. карактеристикама штампача који се траже у изабраном софтверу или учитавање профила одговарајућег штампача (зависно од типа софтвера и података), као и избор типа G кода који користи штампач. Софтверу за моделирање процеса 3D штампе су потребне све информације у вези са штампачем и ограничењима штампача, димензијом радне површине, величином, типом и обликом радне површине, нултом тачком, крајњим тачкама носача екструдера, висине између вођица и радне површине и подешавања у вези са бројем и типом екструдера, положајем млазнице у односу на нулту тачку екструдера и низом других параметара (Слика 5-4). Ако ово није исправно подешено од почетка, G код ће слати команде које штампач не може да обради.<sup>13</sup>

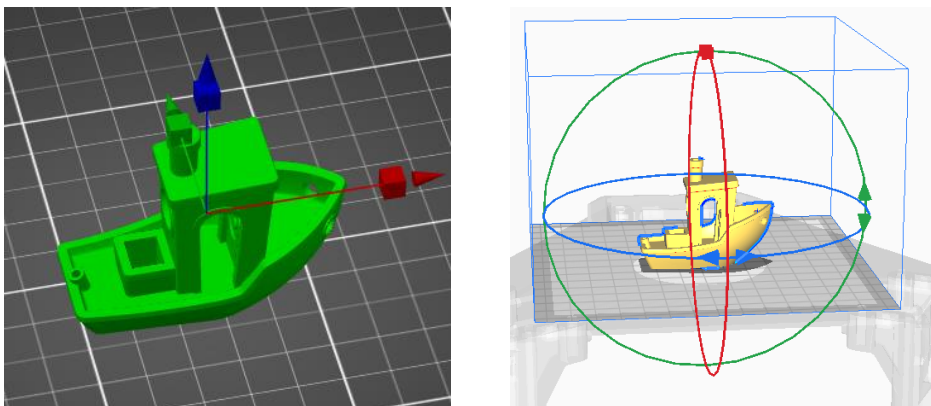
---

<sup>13</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=NYPUAqT4UyI>



Слика 5-4 Пример картице за подешавања параметара штампача у Ultimaker Cura софтверу.<sup>14</sup>

**Увоз, тј. учитавање модела.** Када су подаци о штампачу подешени, потребно је да се увезе модел са којим ће се радити. Као што је већ поменуто, сви софтвери читају *.stl*, али и друге датотеке као што су *.obj*, *.3df* и *.amf* постају све прихваћеније.



Слика 5-5 Неке од функција манипулације моделом у различитим софтверима.

<sup>14</sup> <https://3dlabprint.com/faq/setting-simplify3d-print-planes/>



**Манипулација моделом:** Интерфејс за сечење омогућава контролу положаја дела и његовог контакта са радном површином штампача. У оквиру картица за манипулацију моделом, зависно од софтвера, могуће су разне опције попут оријентације, позиционирања, скалирања, ротације, увећања/умањења, умножавања и др., (Слика 5-5).

#### ***5.3.3.2.2 Подешавање технолошких одлика процеса (штампања)***

Ово је свакако најважнији корак у софтверима за моделирање 3D штампе, од кога највише зависи успех штампања. Сваки параметар процеса се мора исправно подесити како би се добио део одговарајућег квалитета и тачности. Могућности подешавања различитих параметара штампања зависе од софтвера, као и од тога да ли се ради о основном напредном или експертском моду. Неки од најважнијих параметара штампања<sup>15</sup> биће разматрани у даљем тексту.

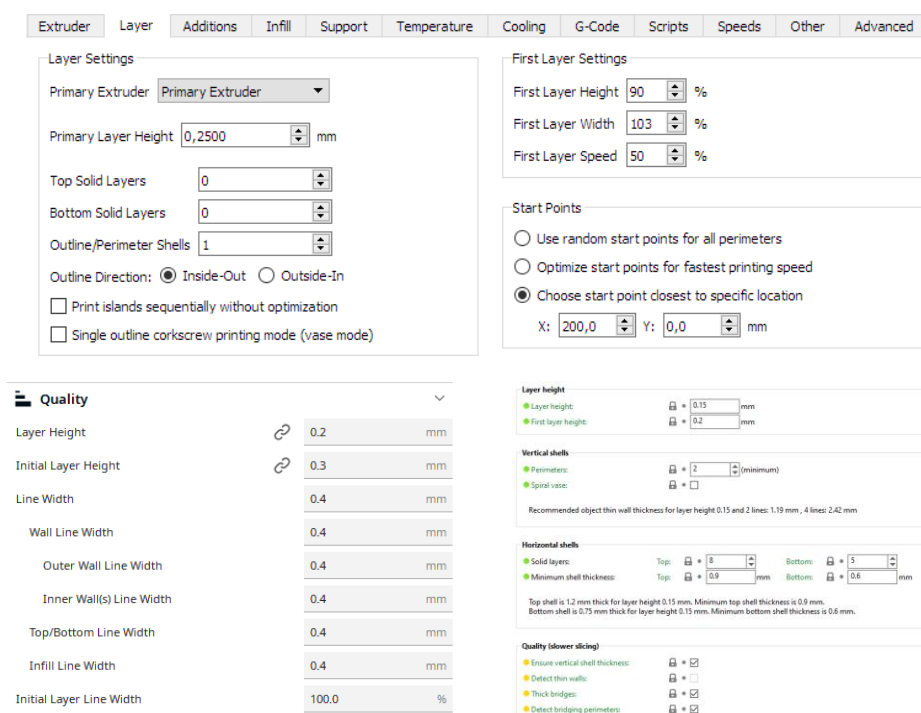
#### ***Висина слоја***

Постављање праве висине слоја је важно јер утиче на квалитет финалног производа и на време штампе. Висина слоја се подешава према жељеној резолуцији штампе, могућности штампача, спецификацији материјала и брзини штампања. Већа висина слоја или ниска резолуција резултираће лошијим квалитетом, грубом површином, али ће време производње бити значајно скраћено јер је потребно мање слојева за завршетак дела. Овакав производни процес би био погодан за брзе прототипове и делове који не захтевају висок квалитет. Резолуција 3D објекта у великој мери зависи од висине његовог слоја. Мање висине слојева дају високу резолуцију и глатку површину. Међутим, укупно време штампања би могло бити дуже. За постизање најбољег квалитета финалних производа потребно је користити најмање могуће висине слоја.

У зависности од опција које нуди *CAPP/CAM* апликација, у кораку подешавања одлика слоја, може се наћи велики број параметара који на одређен начин утичу на квалитет штампе попут: висине и ширине првог слоја, брзине депоновања првог слоја, ширина линија највиших и најнижих слојева, ширине линија спољашњих и унутрашњих слојева, ширина линија за носеће и помоћне структуре, испуну и др., (Слика 5-6).

---

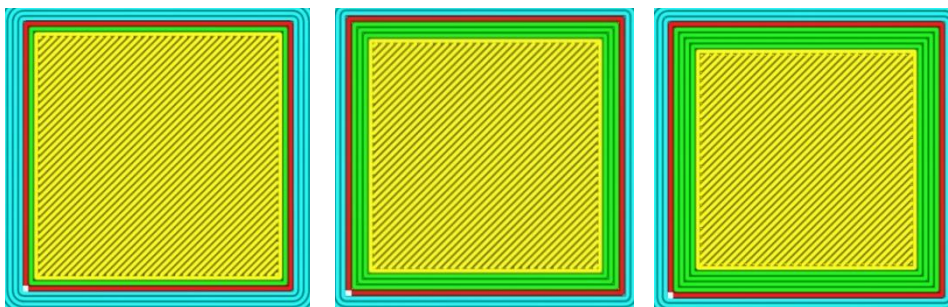
<sup>15</sup> <https://3dlabprint.com/faq/setting-simplify3d-print-planes/>



Слика 5-6 Подешавања везана за слојеве у Simplify 3D, Ultimaker Cura и PrusaSlicer софтверу.

## Љуске

Љуском (*Shell/perimeter*) модела се називају ободни слојеви модела који формирају зид око запремине модела. Подешавање одлика љуске се превасходно односи на задавање дебљине и броја ободних слојева (љуски). Чврстоћа модела се повећава повећањем дебљине љуске. Ово је нарочито пожељно када се спроводи накнадна обрада попут пескарења или хемијских третмана, јер они стањују модел. Повећање броја љуски утиче на повећање времена израде и утрошка материјала, Слика 5-7.



Слика 5-7 Различит број слојева у љусци.

Поред ова два основна параметра, постоји низ додатних опција којима се могу подешавати одлике љуски модела у зависности од софтвера, као што су, на пример, број и дебљина горњих и доњих слојева и др. (Слика 5-8)

a)

Walls

Wall Thickness

0.8 mm

Wall Line Count

2

Optimize Wall Printing Order

☐

Horizontal Expansion

0.0 mm

Top/Bottom

Top/Bottom Thickness

0.8 mm

Top Thickness

0.8 mm

Top Layers

4

Bottom Thickness

0.8 mm

Bottom Layers

4

Monotonic Top/Bottom Order

☐

Vertical shells

Perimeters:

2

(minimum)

Spiral vase:

☐

Recommended object thin wall thickness for layer height 0.15 and 2 lines: 1.19 mm , 4 lines: 2.42 mm

б)

Horizontal shells

Solid layers:

Top:

8

Bottom:

5

Minimum shell thickness:

Top:

0.9 mm

Bottom:

0.6 mm

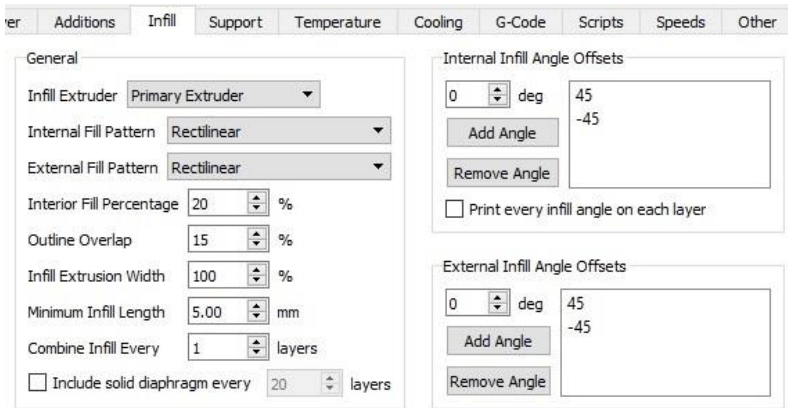
Top shell is 1.2 mm thick for layer height 0.15 mm. Minimum top shell thickness is 0.9 mm.

Bottom shell is 0.75 mm thick for layer height 0.15 mm. Minimum bottom shell thickness is 0.6 mm.

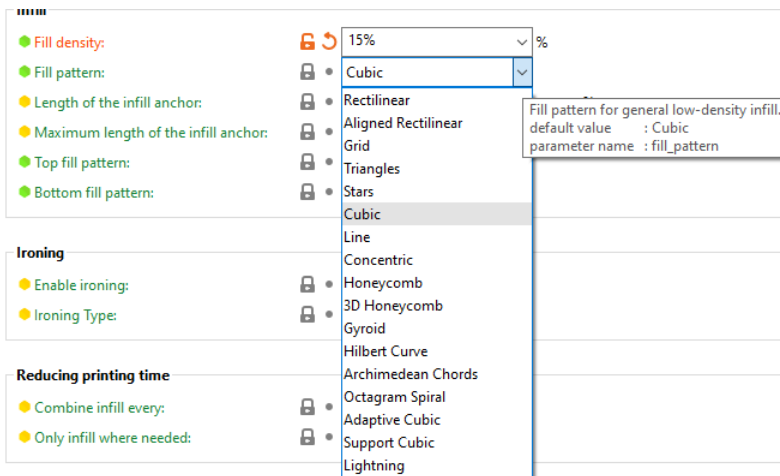
**Слика 5-8** Картице за подешавање одлика љуски у различитим софтверима.

## Испуна

Испуна је материјал који испуњава део штампан на 3D штампачу. Када се говори о одликама *испуне*, мисли се првенствено на густину, тј. *проценат* испуне (Слика 5-9) и *дезен* испуне, Слика 5-10.

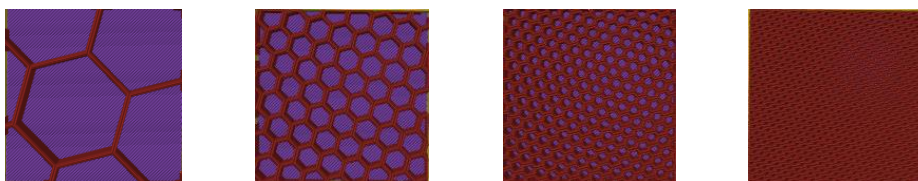


Слика 5-9 Приказ подешавања густине испуне.



Слика 5-10 Приказ избора стила дезена (или шаре или шрафуре) испуне.

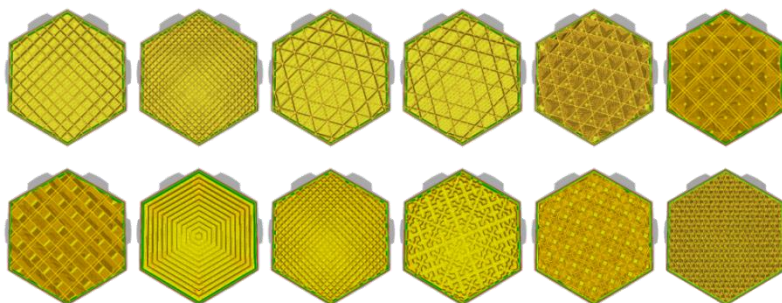
Делови штампани *FFF/FDM* технологијом обично нису потпуно испуњени. Чврстоћа делова зависи у великој мери од густине испуне и повећава се са њеним повећањем, док се флексибилност делова смањује. У зависности од намене дела који се штампа, одређује се оптимални проценат испуне. (Слика 5-11). Прототип и делови који не трпе оптерећења могу се штампати са веома ниским испуном (15, 20 до 35%), што резултира значајним уштедама трошкова и времена, док ће за функционалне делове и оне који трпе велика оптерећења бити потребан већи проценат испуне (више од 50%). Проценат, тј. густина испуне, утиче на време штампања, тежину, крутост и флексибилност 3D штампаних компоненти. Постоје, свакако, и препоручене вредности за проценат испуне у зависности од намене дела који се штампа.



Слика 5-11 Приказ различитих процената испуне 5%, 20%, 40%, 70%.

Дизајн шаре испуне може, такође, значајно да утиче на снагу и флексибилност штампаних делова.

Опет, у зависности од софтвера, постоји велики број шара испуне. Неке од њих су дати за Ultimaker Cura (Слика 5-12) (*grid*, *triangles*, *zig zag*, *lines*, *cubic*, *concentric*, *gyroid* и др...).



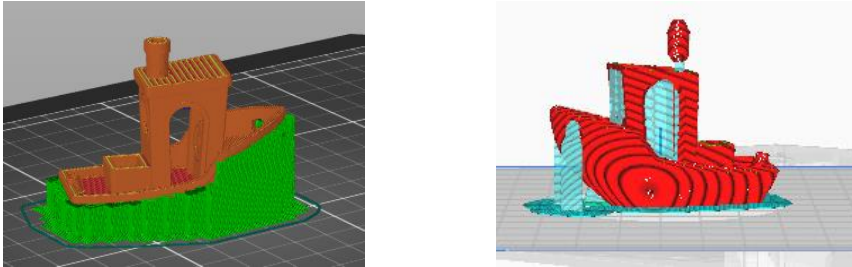
Слика 5-12 Различити дезени испуне код Ultimaker Cura софтвера.

Имајући у виду намену израђеног дела, материјал и потребну чврстоћу, бирају се различите шаре и постоје одговарајуће препоруке за тип испуне. Најједноставније су типа: *lines*, *zigzag* (за брзу штампу без значајне чврстоће делова), *triangles*, *grid* и сл. (за делове стандардне носивости), *cubic*, *cubic subdivision*, *octet*, *gyroid* (функционалне делове равномерне чврстоће у свим правцима) и за флексибилне делове (*concentric*, *cross*, *cross 3D*).

### Носећа структура

У процесима 3D штампања један слој се штампа преко другог, претходно нанесеног слоја. То значи да је сваком слоју потребан основни слој који ће га подржати током штампања. Ако модел има препусте, висеће делове или слојеве који нису у контакту са радном површином, и даље му је потребан потпорни слој како се не би урушио током процеса штампања. Они су неопходни и за делове који се штампају под нагибом. Овај носећи слој се назива носећа структура. Софтвери за моделирање процеса 3D штампе имају могућност уметања носеће структуре тамо где је то потребно. Носеће структуре се могу генерисати аутоматски или се могу

формирати непосредним моделирањем ради боље контроле резултата штампе (Слика 5-13).



**Слика 5-13** Примери различито дефинисаних носећих структура за исти део у две различите *CAPP/CAM* апликације.

Поред већ припремљених конструкција (облика) носеће структуре сваки од ових програма има и могућност задавања материјала од којих ће се она израђивати (јер потпорна структура не мора бити од истог материјала, као и сам део који се штампа). Такође, на располагању су и опције којима се задаје начина израде и позиционирање носећих структура, густине и низа других параметара зависно од режима у коме се ради и врсте софтвера, а, наравно, и од вештине корисника (Слика 5-14). Носеће структуре треба израдити тако да одраде своју функцију, али и да се релативно лако могу уклонити након штампе.

Support material	
● Generate support material:	<input checked="" type="checkbox"/>
● Auto generated supports:	<input checked="" type="checkbox"/>
● Overhang threshold:	<input type="text" value="50"/>

Raft	
● Raft layers:	<input type="text" value="0"/> layers
● Raft contact Z distance:	<input type="text" value="0.2"/> mm

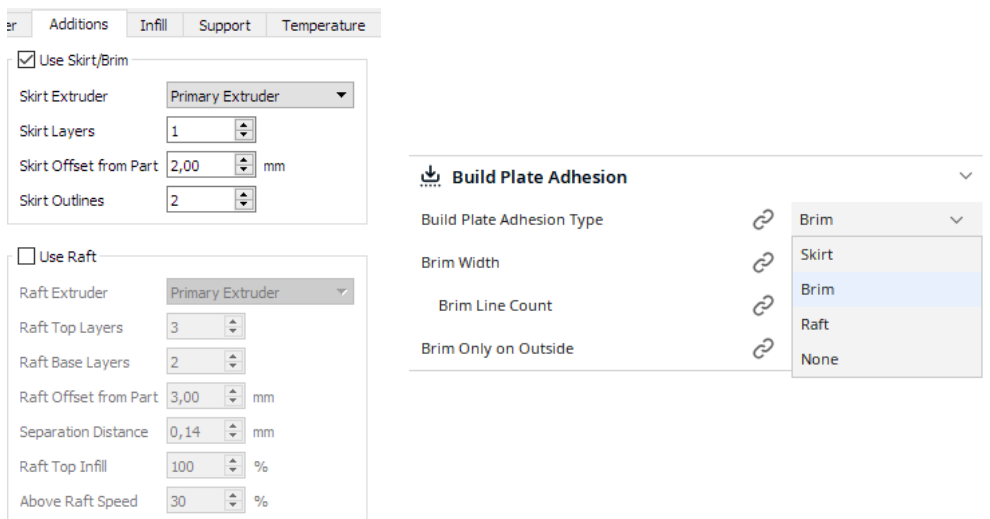
  

Options for support material and raft	
● Style:	<input type="text" value="Grid"/>
● Top contact Z distance:	<input type="text" value="0.15"/> mm
● Bottom contact Z distance:	<input type="text" value="Same as top"/> mm
● Pattern:	<input type="text" value="Rectilinear"/>
● Pattern spacing:	<input type="text" value="2"/> mm
● Closing radius:	<input type="text" value="2"/> mm
● Top interface layers:	<input type="text" value="2 (default)"/> layers
● Bottom interface layers:	<input type="text" value="0 (off)"/> layers
● Interface pattern:	<input type="text" value="Rectilinear"/>
● Interface pattern spacing:	<input type="text" value="0.3"/> mm
● Support on build plate only:	<input checked="" type="checkbox"/>
● XY separation between an object and its support:	<input type="text" value="80%"/> mm or %
● Don't support bridges:	<input type="checkbox"/>

**Слика 5-14** Приказ картице са опцијама за подешавања одлика носеће структуре.

## Помоћне структуре

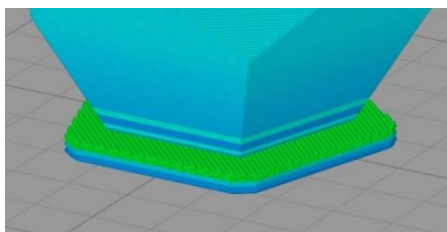
Често се догађа да се 3D штампани делови залепе за радну површину, тј. подлогу (физички, а не у софтверу). Да би се то избегло, софтвери нуде коришћење неких структура које олакшавају одвајање израђеног дела од радне површине и омогућавају правилан ток материјала (RAFT, SKRIT и BRIM) - Слика 5-15.



Слика 5-15 Картице за подешавање помоћних структура.

Свака од ових помоћних структура има своје специфичности и намену, о чему ће бити више речи у даљем тексту.

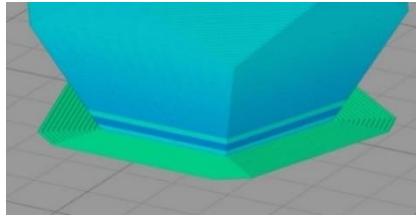
„Сплав”, **Raft**: Дебља подлога између дела и радне површине која омогућава боље приањање модела за радну површину – Слика 5-16.



Слика 5-16 Приказ *Raft* подлоге (у виду сплава).

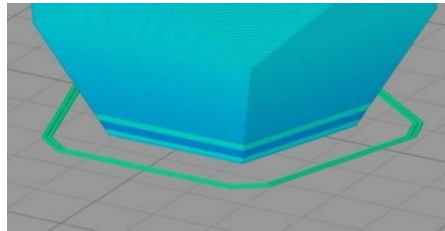
„Обод”, **Brim**: Додатне линије материјала око првог слоја које додирују модел, омогућавајући ширу контактну површину (Слика 5-17). Обод додаје једнослојну равну површину око основе модела како би се спречило савијање. Повезан је са моделом и омогућава ширу контактну површину, као и приањање модела за радну површину и правилан ток филамента.





**Слика 5-17** Приказ *Brim* подлоге (у виду подножне ободне површине).

„Сукња”, **Skirt**: Једна континуална линија око дела, али која га не додирује тј. на одређеном растојању је од њега, Слика 5-18. Омогућава тестирање протока материјала тј. омогућава правилан ток филамента и нивелисање радне површине пре него што се почне са израдом самог дела.

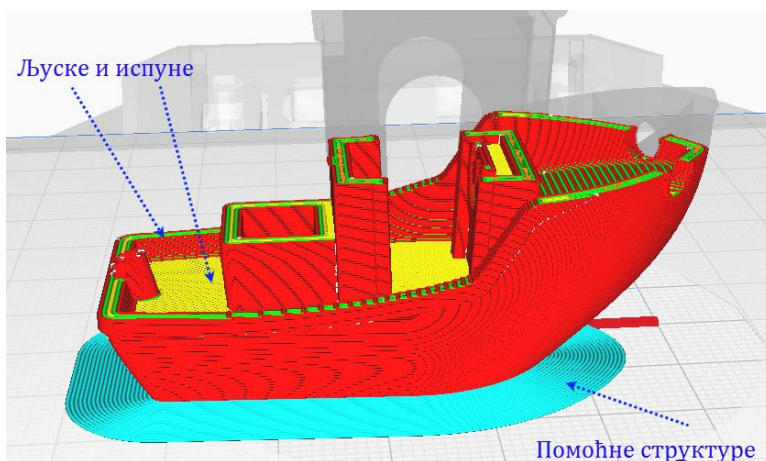


**Слика 5-18** Приказ *Skirt* подлоге (у виду „сукње”).

Ове помоћне структура имају и низ додатних подешавања у оквиру сваке од њих које зависе од софтвера.

### **Подела запремине на слојеве**

Један од најважнијих функција *CAPP/CAM* апликација за моделирање процеса 3D штампе је припрема путање екструдера, односно релативног кретања екструдера и радне површине. Да би се створила путања, неопходно је поделити запремину модела на велики број слојева. За сваки слој се добија контура попречног пресека дела са облашћу коју треба испунити. „Путања алата” се формира аутоматски спрам подешених одлика начина „скенирања” тих контура и области, даље, спрам подешених одлика љуски, испуне и потпорних и помоћних структура. Ово је функција *slicing*-а или стварања тих слојева и одговарајуће сложене путање (низ великог броја путања у слојевима). *Slicer* се због тога сматра „централним” програмским модулом *CAPP/CAM* апликације за моделирање процеса 3D штампе. Овде се могу видети сви подешени елементи, сваки слој модела и симулација израде из слојева (попут анимације кретања алата по путањи код глодања и стругања) - Слика 5-19. Већина софтвера срачунава и време штампања и количину утрошеног материјала при штампању.



Слика 5-19 Приказ анимације израде делова на 3D штампачу.

### ***Брзина штампе***

Брзина штампе подразумева брзину кретања екструдера, тј. млазнице током наношења материјала. Ова брзина се, у зависности од 3D штампача, креће најчешће у распону од 10 до 150 mm/s, мада данас има и штампача који имају и веће брзине штампе (од 200 до 500 mm/s) .

Софтвер за моделирање процеса 3D штампе има подешавања брзине која се обично подешавају на основу геометрије 3D модела. Софтвер има подразумевана подешавања за брзину која може бити нижа од жељене вредности. Брзина такође може да варира у зависности од врсте материјала који се користи. Обично је за PLA препоручена брзина штампања 40-60 mm/s (30-60 mm/s су стандардне брзине штампе). Што је мања брзина штампе, део има већу прецизност. За врло прецизне штампе брзина се креће од 10 до 30 mm/s. Данас постоје и штампачи који имају велике брзине штампе. Брзину штампе треба бирати у зависности од температуре екструдера, висине слоја, материјала, процента испуне, носеће структуре и сл.

И на овом кораку постоје велики број опција којима се подешава брзина штампања (наношења) испуне, спољашњих и унутрашњих зидова, првог слоја, крајњих слојева, празног хода, помоћних структура и сл.

### ***Температура***

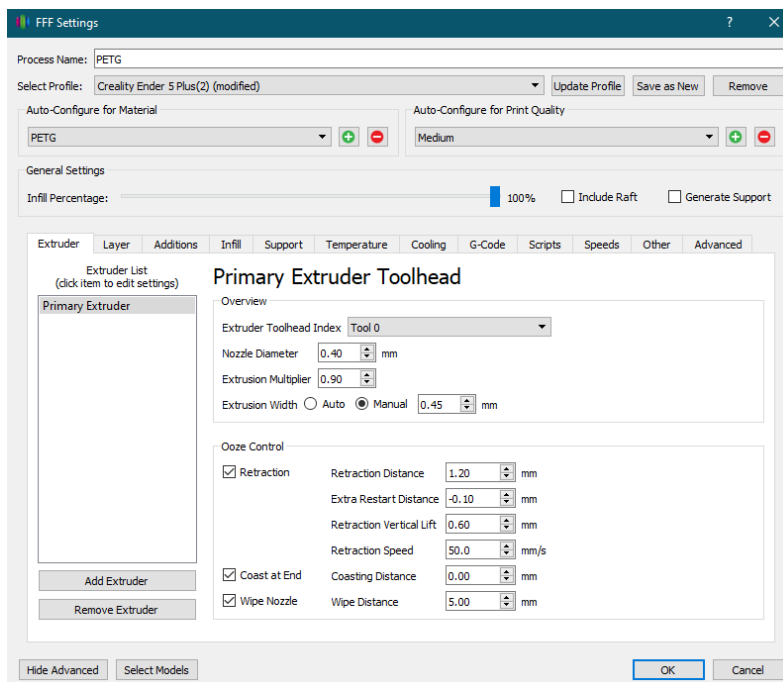
Једно од најважнијих подешавања у вези са процесом 3D штампе је температура екструзије. Овај параметар је потребно калибрисати, односно прилагодити спрам подешене брзине штампања. Важно је повећати температуру ако је брзина штампања подешена на већу вредност. Неуспешност брзине штампања са температуром може довести до „недо-

вољног истискивања” због слабијег топљења фила-мента. Такође, преви-соке температуре могу узроковати „прекомерно истискивање” и довести до лошег квалитета штампе. Препоручује се повећање температуре између 5–10 °C за сваких 5–10 mm/s пораста брзине штампања.

Још један важан фактор који треба узети у обзир приликом контроле температуре је врста материјала који се користи у процесу штампања. За сваки материјал могу се наћи препоручене вредности температура које се користе у процесу 3D штампања.

## Екструдери

Подешавање екструдера се врши подешавањем различитих параметара попут пречника млазнице, позиције екструдера, параметара ретракције (увлачења) материјала, тј. контроле цурења материјала (брзине, дужине и др.) - Слика 5-20. 3D штампачи са више екструдера су све више у употреби. Штампачи са више екструдера имају 2 или више екструдера. Обично се користе за штампање 3D објекта са различитим материјалима или у различитим бојама. Штампач ће имати наменски екструдер за сваки материјал.

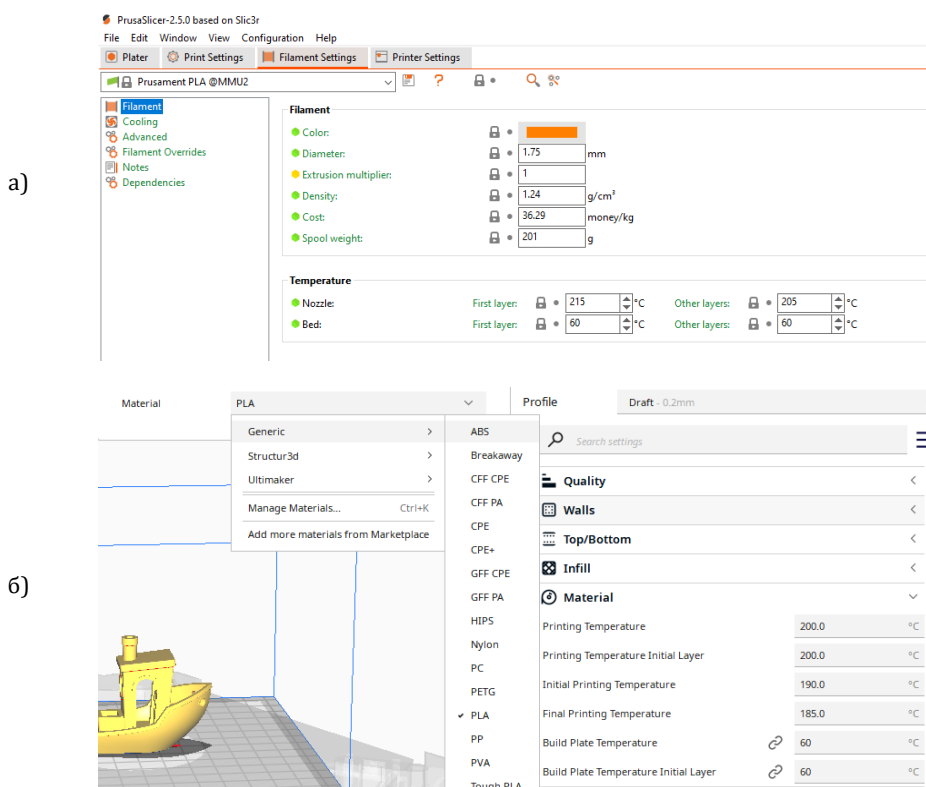


**Слика 5-20** Приказ картице са опцијама за подешавање одлика екструдера.

Такође, приликом моделирања процеса 3D штампе, могуће је учинити процес продуктивнијим ако се један екструдер намени штампању једног региона, а други штампању другог региона истовремено. Подешавање одстојања сваког од екструдера је у овом случају најбитније како би се предупредила оштећења дела и екструдера током штампе. Из тог разлога потребно је обавити тзв. калибрацију сваког екструдера (нешто попут аксијалне, или тзв. Z- компензације глодала - одстојање одговарајуће проминентне тачке алата од тачке T).

### 5.3.3.2.3 Подешавања материјала

Подешавање материјала подразумева избор одговарајућег материјала од понуђених са листе са свим карактеристикама, укључујући и пречник материјала, тј. филамента и доделу истог одговарајућем екструдеру (ако их има више). Такође је могуће додавање нових материјала и њихових карактеристика, зависно од софтвера. Ако се користи више материјала, сваком је могуће доделити другу боју ради прегледности (Слика 5-21).



Слика 5-21 Картице подешавања материјала у PrusaSliceru и Ultimaker Cura софтверу.

Пошто следећа два параметра имају директно везе са материјалом, о њима ће бити речи у овом одељку.

### **Проток (*flow / extrusion multiplier*)**

Проток 3D штампача се обично задаје у виду множиоца екструзије и односи се на параметар којим се одређује количина материјала за екструдирање. Подразумева се да је вредност овог параметра подешена на 1,0 или 100%. Када се овај параметар подеси на 1,1 или 110%, проток се повећава за 10%.

### **Ретракција**

Контрола цурења материјала, тј. увлачење материјала, одређује количину и брзину увлачења материјала назад у млазницу, како би се спречило цурење материјала када се не екструдира. Увлачење се контролише помоћу неколико специфичних подешавања, међу којима су главни - дужина ретракције и брзина ретракције. Међутим, ова подешавања треба подесити пажљиво у комбинацији са температуром млазнице. Подешавања увлачења се мењају у малим интервалима и не праве се никаква значајна повећања док се не покуша снижавање температуре. Превисе увлачења може да изазове заглављивање млазнице. Друга подешавања материјала зависе од врсте материјала и односе се, углавном, на подешавање температура (екструдера, првог слоја, радне површине) и сл.

Након анализе, симулације и анимације процеса штампе у *CAPP/CAM* апликацији, уколико је модел процеса изводљив и задовољава циљане кључне показатеље учинка технолошког поступка израде дела, покреће се постпроцесор ради стварања извршног програма који је читљив за контролер 3D штампача.

#### **5.3.3.3 Извршни програм *FDM/FFF* адитивног производног процеса**

Као што је већ поменуто, извршни програм процеса 3D штампе укључује све извршне инструкције и релевантне информације које су потребне да би се исправно управљало радом 3D штампача током израде сваког слоја 3D објекта. Као и у случају других *CAPP/CAM* апликација, и апликације намењене моделирању процеса 3D штампе генеришу извршни програм аутоматски, спрам изабраних опција у вези са начином записивања извршних инструкција. Та подешавања зависе од врсте контролера извршних органа машине и фирмвера којима се ти контролери управљају. Такође, УЈ НУМАП (3D штампачи) намењене за спровођење

FFF/FDM процеса, као и УЈ других врста НУМА, најчешће користе ISO 6983 формат записивања припремних, извршних и помоћних инструкција или тзв. G-код. Како су све НУМАП новијег датума, скоро све УЈ ових машина су на Windows, Linux или iOS оперативним системима. Све УЈ НУМАП искључиво користе Ethernet и TCP/IP комуникациони протокол и извршни програм се непосредно шаље контролерима извршних органа НУМАП. Поред већ добро познатих извршних инструкција кретања у којима доминирају подаци о геометрији путање, односно релативног кретања млазнице и радног стола, извршни програм, такође, садржи и низ тзв. припремних, технолошких и помоћних инструкција за контролу специфичних одлика технолошког процеса АП. Ту се, пре свега, издвајају инструкције за контролу брзине екструзије материјала, температуре радне површине и млазница, затим инструкције за укључивање и искључивање система хлађења (нпр. вентилатора). Као и у случају УЈ различитих произвођача, и овде, код УЈ НУМАП, постоји могућност формирања тзв. проширеног скупа инструкција којима се синтакса G-кода прилагођава одговарајућем процесу АП и фирмверу контролера извршних органа машине и коначно самим својствима машине. Према томе, могуће је наићи на мале разлике у синтакси G-кода код различитих произвођача УЈ и НУМАП, најпре, у скупу тзв. резервисаних адреса које су, иначе, предвиђене за прилагођавање систему. Већина *CAPP/CAM* апликација за моделирање процеса 3D штампе омогућава кориснику избор тзв. постпроцесора, што се обично решава једноставним избором речника или табеле пост-процесорских директива за одговарајућу врсту НУМАП (3D штампача). Најчешће варијанте речника G-кода које срећемо у пракси су оне које највећи број УЈ 3D штампача могу да интерпретирају (најчешћи фирмвери УЈ 3D штампача су RepRap, Marlin, UltiGcode, Smoothie и др.).

У синтакси извршног програма за 3D штампу је могуће уочити три посебна дела или целине (параграфа) садржаја и то<sup>16</sup>:

Први део се назива и *иницијализација процеса (initialization)*. У овом делу програма налазе се углавном тзв. *припремне* и *помоћне* инструкције према којима се контролери НУМАП инструкују да обаве припремне радње који претходе самом процесу наношења материјала (штампања модела).

Други део се назива *штамна (printing)*. У овом делу извршног програма доминирају тзв. извршне инструкције којима се контролише кретање радног стола главе екструдера. Из тог разлога, у овом делу кода може се наћи велики број редова у које су уписане координате одредиш-

---

<sup>16</sup> <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/>

них тачака. Покрети у XY равни се односе на штампу једног слоја, док свако померање у Z правцу представља почетак штампања следећег слоја. Са становишта количине садржаја, тј. броја линија кода, овај део је, свакако, више од 90% кода.

У трећем, завршном делу извршног кода, који се назива и *ресетовање штампача*, могу се наћи неколико линија кода у коме поново преовладавају *припремне* и *помоћне* инструкције којима се штампач доводи у подразумевано стање. На пример, то су померање млазнице у унапред дефинисану (Home) позицију, искључивање грејача бризгаљке и радне површине, искључивање система за хлађење, прекид рада мотора и др.

### 5.3.3.3.1 Специфичне команде G-кода за процес 3D штампе

С обзиром на то да се ради о истом стандарду, ISO 6983, на овом месту нећемо објашњавати детаље синтаксе G-кода (то треба да је већ познато читаоцу). Ипак, овде ћемо навести неколико специфичних команди које се јављају у програмирању припремних, извршних и помоћних инструкција за 3D штампаче. Линија G кода прати одређену синтаксу.

Први аргумент линије извршног програма је ознака типа команде или инструкције. Као што је већ познато, припремне и извршне инструкције су означене знаком „G”, док су помоћне инструкције означене са „M”. Свака команда је праћена бројем или адресом који прецизно идентификује врсту команде (G0; G1; G2, ... G28, ... G90, G91 ...). У другом делу линије извршне инструкције следе параметри који у потпуности дефинишу радњу која ће се обавити задатом врстом команде. Свака врста команде има одговарајући скуп параметара (чији је формат и садржај могуће унети).

Врста команде	Број команде	Параметри
<b>G</b>	<b>0000</b>	<b>&lt;Param.&gt; &lt;Param.&gt; &lt;Param.&gt; ...</b>
<b>M</b>		

#### Пример:

**G1 X20 F1500** где је:

**G**           тип или класа команде,  
**1**           број (врсте) команде,  
**X, F**       назив параметра,  
**20; 1500** вредност параметра.

Коментари који корисник може унети у сваку линију кода након знака за крај команде. Најчешће је то тачка-зарез: „ ; ”. Приликом интерпретације извршног програма, УЈ НУМАП игнорише коментаре. На овај



начин, програмер даје семантички опис команде. Ево примера линије која има коментар кода:

**G1 X10 F3600 ;** *Pravolinijsko kretanje u tacku koordinate X=10mm, Y=Y(prethodne tacke), Z=Z(prethodne tacke) sa pomakom od 3600 mm/min*

Команде G0, G1 и G2, G3 су познате инструкције за задавање праволинијског (G0, G1) и кружног кретања (G2, G3). Код 3D штампача, G0 се користи за тзв. брзи ход, и у том режиму кретања се не обавља истискивање, тј. екструдирање материјала. Приликом кретања које је задато G1, G2 и G3 могуће је активирати екструдирање материјала на радну подлогу. G1 команда се може користити за померање само једне осе или више оса одједном, с тим што се екструдер контролише као и свака друга оса, тако да се ова команда може користити и за истискивање или увлачење филамента из млазнице. Параметри за ове врсте команди су X, Y и Z координате одредишне позиције, количина материјала коју треба екструдирати током кретања и брзина или помак кретања у јединицама које су дефинисане одговарајућом припремном G функцијом.

	Координата одредишне тачке			Количина екструзије	Помак
<b>G1</b>	<b>X[ ]</b>	<b>Y[ ]</b>	<b>Z[ ]</b>	<b>E[ ]</b>	<b>F[ ]</b>

## Пример

**G0 X30;** *Pravolinijsko kretanje brzim hodom u tacku sa koordinatama X\_krajnje=30mm, Y\_krajnje=Y\_pocetne*

**G1 X20 Y50 Z1 E1 F1000;**

Инструкција штампачу да се креће праволинијски (G1) ка координатама одредишне тачке X=20mm, Y=50mm, Z=1mm радним ходом са брзином или помаком (F) од 1000mm/min и при екструдирању (E) 1 mm материјала.

**G1 X25 E10 F1900 ;**

Инструкција штампачу да екстудира 10mm материјала приликом праволинијског кретања до одредишне тачке са координатама X=25mm (Y и Z координате одредишне тачке су исте као и Y и Z координате почетне тачке) брзином (помаком) од 1900mm/min.

## **M82 u M83 (Extruder positioning mode)**

Команде M82 и M83 су из класе помоћних команди које дају инструкције контролерима 3D штампача у ком „режиму” позиционирања

екструдера треба радити. Позиционирање екструдера филамента у односу на обрадак (радну подлогу) се, практично, третира као контрола „четврте” осе 3D штампача. Могуће је користити апсолутни или релативни начин позиционирања:

**M82** (*Absolute Positioning*) - команда поставља 4. осу (екструдер) на апсолутни начин позиционирања,

**M83** (*Relative Positioning*) - команда поставља 4. осу на релативни начин позиционирања.

Какво је иницијално подешавање за начин позиционирања екструдера зависи од *CAPP/CAM* софтвера, тј. *3D Slicer*-а који се користи. На пример, код *Cura 3D Slicer*-а углавном се користи апсолутно позиционирање екструдера (M82), док се код *Prusa 3D Slicer*-а користи релативно позиционирање (M83).

### ***G28 Auto Homing***

Команда G28 је добро позната команда из синтаксе која се користи код других НУМА и она задаје инструкцију контролеру НУМАП да аутоматски изврши кретање „алата” до тзв. *Home* (почетне) позиције операције. Ова инструкција код 3D штампача помера радни сто и екструдер у њихову „нулту” позицију или на почетни положај. Овом командом се, такође, „проверавају” физичке границе кретања у свим правцима (осама) и „поновна провера” позиције координатног почетка координатног система машине. Извршење овог кретања је важно не само да би се машина репозиционирала, већ и да бисмо спречили да се глава штампача помери ван граница радног простора машине. Команда G28 се обично изводи пре сваког процеса штампања. У зависности од тога коју осу желимо да „доведемо у нулти положај”, наводиће се параметри оса које желимо да померимо. Ако се не наведе ни једна оса, подразумеваће се да се све осе „доведе у нулти положај”.

Синтакса команде:

**G28 [X], [Y], [Z]**

Пример:

**G28;** померање „свих оса” у нулти положај.

**G28 Z;** помера Z осу у нулти положај.

### ***G29 Bed Leveling***

Команда G29 је команда којом се контролер 3D штампача инструкује да аутоматски обави тзв. *нивелацију* радне површине, тј. радне платформе. Постоји неколико различитих метода за нивелисање радне површине пре штампања и то су аутоматске радње (циклуси) које одређује произвођач машине и софтвера. Према томе, то обавља сам фирмвер УЈ 3D штампача и корисник не може да мења ту процедуру.

Команде G28 и G29 обично иду једна за другом јер је неопходно најпре довести осе у почетни, нулти положај, а, потом, у тој позицији обавити нивелацију. Из тог разлога се G29 обично уписује у наредној линији извршног програма (након линије са G28 командом).

### ***G92 – Set Current Position***

Инструкцијом G92 се експлицитно задаје команда контролеру да позиционира систем са тренутне позиције у тачно одређену одредишну тачку (координату).

Синтакса команде

**G29 [X], [Y], [Z]**

На пример:

**G92 X0 Y0 Z0;** инструкција којом се контролеру 3D штампача задаје комада да изврши позиционирање радног стола на тзв. нулту или почетну позицију.

**G92 E0;** инструкција којом се контролеру 3D штампача задаје комада да изврши постављање екструдера у нулту позицију, тј. ресетовати позицију екструдера.

#### ***5.3.3.3.2 Специфичне помоћне команде (Mnnn)***

Помоћне комаде код 3D штампача које ћемо поменути у овом поглављу су следеће:

##### ***M104 & M109 Set nozzle temperature***

Командама M104 и M109 се подешава температура млазнице и то:

**M104** подешава температуру млазнице на одређену вредност и наставља извршење програма. Након започињања загревања млазнице до циљне температуре, штампач ће наставити да извршава следећу командну линију док загрева млазницу.

**M109** подешава температуру млазнице на одређену вредност и прекида извршење програма, док се не постигне жељена температура<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/>

**M104 S**<температура у °C > **I**<индекс>

**M109 S**<температура у °C > **R**<температура у °C > **T**<индекс>

Обавезни параметар је вредност жељене температуре у [°C] млазнице коју треба уписати иза **S**. Уколико 3D штампач поседује више екструдера, неопходно је унети и индекс „алата” односно екструдера.

**Пример:**

**M104 S240 T1**; подешавање циљане температуре млазнице 1. екструдера на 240 °C.

**Пример:**

**M109 S240 T2**; подешавање циљане температуре млазнице 2. екструдера на 240 °C и прекид извршења програма док се не достигне задата температура.

На исти начин, могуће је подешавање температуре радне површине с тим да се користе команде **M140** и **M190**:

*M140 & M190: Set Bed Temperature*

Командама **M140** и **M190** се подешава температура радне површине и то:

**M140** подешава температуру радне површине на одређену вредност и наставља извршење програма. Након започињања загревања радне површине до циљне температуре, штампач ће наставити да извршава следећу командну линију док загрева платформу.

**M190** подешава температуру радне површине на одређену вредност и прекида извршење програма док се не постигне жељена температура.

Синтакса команде за подешавање температуре радне површине

**M140 S**<температура у °C > **I**<индекс>

**M190 S**< температура у °C > **R**< температура у °C > **T**<индекс>

Пример:

**M140 S90**; подешава се циљана температура радне површине на 90°C

**M190 S90**; подешава се циљана температура платформе на 90°C и паузира се извршење програма док се не достигне задата температура платформе.

*M106 & M107: Fan Control*

Још једна битна помоћна инструкција, која се често користи у процесима 3D штампе, је она којом се врши контрола рада вентилатора (расхладног система коморе). Ово је посебно корисно за вентилатор за хлађење делова, јер су потребне различите брзине током процеса штампања током првог слоја и премошћавања.

Синтакса команде за рад вентилатора

**M106 S**<брзина> **P**<индекс>

**M107 P**<индекс>

**M106** укључује вентилатор и подешава његову брзину. Параметром **S** се дефинише брзина од 0 до 255. Вредност од 255 обезбеђује 100% снаге, а било који број унутар овог опсега ће одредити проценат у складу са тим.

#### **Пример**

**M106** ; укључите вентилатор на максималној (100%) брзини

**M106 S128** ; укључите вентилатор и подесите га на 50% снаге

Више вентилатора са контролом брзине може се дефинисати параметрима индекса (**P**), пошто сваком вентилатору фирмвер додељује одговарајући индекс (1, 2, ...).

**M107** командом се искључује рад одређеног вентилатора. Ако није наведен индексни параметар, вентилатор за хлађење делова је једини који треба да се искључи.

## Литература

- 3D printing G-Code Tutorial. (2019). Retrieved January 17, 2023, from <https://www.simplify3d.com/resources/articles/3d-printing-gcode-tutorial/>
- 3D slicer software: How it works and what to expect. (2022). Retrieved January 17, 2023, from <https://www.solidprint3d.co.uk/3d-slicer-software-how-it-works/>
- A quick guide to Slicers. (n.d.). Retrieved January 17, 2023, from <https://buildbee.com/blog/article/a-quick-guide-to-slicers>
- Bugdayci, H., Grunert, J., & Keller, F. (2014). Analysis of slicing-tools for fused deposition modeling 3D-printers and comparison of different printers (thesis), Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Formlabs Software. (n.d.). Retrieved from <https://formlabs.com/software/>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). Additive Manufacturing Technologies. New York, United States: Springer Publishing.
- Jakk. (2022). What is slicing software, and what does it do? Retrieved January 17, 2023, from <https://additive-x.com/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>
- Kolla, M. (2021). What is the role of slicing in 3D printing? Retrieved January 17, 2023, from <https://medium.com/fabheads/what-is-the-role-of-slicing-in-3d-printing-13d3bdbcd5bf5>
- Materialise Magics | Data and Build Preparation Software. (n.d.). Retrieved from <https://www.materialise.com/en/industrial/software/magics-data-build-preparation>
- PrusaSlicer | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa. (n.d.). Retrieved from [https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer\\_424/](https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/)
- Prusaslicer. (n.d.). Retrieved January 17, 2023, from [https://help.prusa3d.com/category/prusaslicer\\_204](https://help.prusa3d.com/category/prusaslicer_204)
- Rafts, skirts and brims (2019). Retrieved January 17, 2023, from <https://www.simplify3d.com/resources/articles/rafts-skirts-and-brims/>
- Simplify3D In-Depth Articles (2019). Retrieved January 17, 2023, from <https://www.simplify3d.com/resources/articles/>
- Simplify3D Software. (2023). Home. Retrieved from <https://www.simplify3d.com/>
- Slicing and G code: The bridge between 3D model and 3D printer. (n.d.). Retrieved January 17, 2023, from <https://support.snapmaker.com/hc/en-us/articles/4409195239575--Slicing-and-G-Code-The-Bridge-Between-3D-Model-and-3D-Printer>
- The Simplify3D V5 software features. (2022, December 20). Retrieved January 17, 2023, from <https://www.simplify3d.com/products/simplify3d-software/features/>
- Trajanović, M., Grujović, N., Milovanović, J., Milivojević, V. (2008). Računarski podržane brze proizvodne tehnologije. Kragujevac: Mašinski fakultet
- UltiMaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software. (n.d.). Retrieved from <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- Xometry, T. (2022). Slicer in 3D printing: Definition, features, and how it works. Retrieved January 17, 2023, from <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/what-is-a-slicer-in-3d-printing/>
- Миловановић, Ј. (2014). Примена адитивних технологија у изради анатомски прилагођених скафолда за реконструкцију коштаног ткива (докторска дисертација), Машински факултету у Нишу, Ниш.

# 6 МОДЕЛИРАЊЕ ОПЕРАЦИЈА МЕРЕЊА ГЕОМЕТРИЈЕ

---

- 6.1 Појам скенирања физичких објеката
- 6.2 Процес скенирања
  - 6.2.1 Бесконтактне методе
  - 6.2.2 Контактне методе
- 6.3 Координатне мерне машине
  - 6.3.1 Тачност СММ-а
  - 6.3.2 Конструктивна извођења картезијанских СММ-а
  - 6.3.3 Конструктивне одлике некартезијанских СММ-а
  - 6.3.4 Карактеристике мерне опреме СММ-а
  - 6.3.5 Софтвер СММ-а
- 6.4 Поступак скенирања геометрије
  - 6.4.1 Дефинисање параметара скенирања
- 6.5 Поступак моделирања операција мерења геометрије помоћу *CAPP/CAM* апликације
- Литература





Данашњи правац развоја науке и технологије доводи до тога да, познавањем само једне технологије, човек не може правилно да разуме рад уређаја који се сваким даном све више усавршавају. Отуда и потреба за уском специјализацијом, као и за великим тимом стручњака који ће обављати одређене послове (посебно ако су сложене природе). Имплементација електронике, посебно њеног дела који се односи на рачунарску технику, довела је до тога да ниједна грана технике данас себи не може да дозволи рад без примене савремених решења из области електронике, а посебно рачунарске технике. Што се тиче производног машинства, чији су захтеви усмерени ка добијању што квалитетнијих производа, електроника и електронске компоненте добијају све значајније место. Циљ који треба испунити је добијање квалитетног производа који је конкурентан са ценом на тржишту и који треба произвести за што краће време. Када је брзина добијања производа у питању, могу се користити савремене производне технологије и средства, а један од њих су системи за брзи развој производа, углавном базирани на примени адитивних технологија. Такође, у овом делу поглавља битно је поменути да постоји и дигитална израда прототипа (*Digital Prototyping*), а коју треба разликовати од система за брзи развој производа јер се ради о креирању, односно развоју дигиталног модела са свим аспектима реалног модела. Фокус овог поглавља биће на технологијама које помажу у дигитализацији реалних физичких модела, односно *реверзном инжењерингу*, фокусираном на креирању 3D геометријског модела производа, тј. *реверзном моделирању*. Ради остваривања датог циља, потребно је користити различите уређаје (скенере), који омогућавају пренос геометријских и тополошких карактеристика производа у дигитални формат. То су релативно комплексни уређаји који могу да садрже различите компоненте, а најважније су давачи (сензори), оптичка средства (сочива, огледала), камере и, на крају, али не мање важни, рачунари и софтвер. Рачунари су потребни јер се сва израчунавања и моделирање одвија у њима уз помоћ одговарајућег софтвера. Број различитих метода које се примењују данас у реконструкцији 3D модела производа и које су базиране на специфичним технологијама није мали. У овом поглављу биће обрађене оне које се, по мишљењу аутора, највише користе у пракси. Сваким даном се појављују нове методе засноване на постојећим или ново-развијеним технологијама аквизиције података о производу, што је добро и што значи да се квалитет добијених 3D модела производа све више унапређује.

## 6.1 ПОЈАМ СКЕНИРАЊА ФИЗИЧКИХ ОБЈЕКТА

У свакодневној пракси наилазимо на различите скенере, на пример: приликом скенирања докумената или бар-кода производа у продавници, као и приликом скенирања обичних фотографија. Ово су тзв. скенери слика, односно дводимензионалних контура. Када говоримо о скенирању физичких објеката, мислимо на аквизицију различитих података о објекту. Подаци могу бити: физички, термички, механички, хемијски, као и друге карактеристике које је могуће преузети са објекта. Скенирањем можемо добити потпуну слику о објекту. Разним поступцима аквизиције података може се добити потпуни дигитални близанац објекта (производа) који се анализира, што подразумева и геометријску копију. Методе скенирања се могу генерално поделити на неразарајуће (недеструктивне), које користе разне углавном контактне, оптичке и електромагнетне технологије и разарајуће (деструктивне), које се базирају на методама разарања материјала као што је сечење.

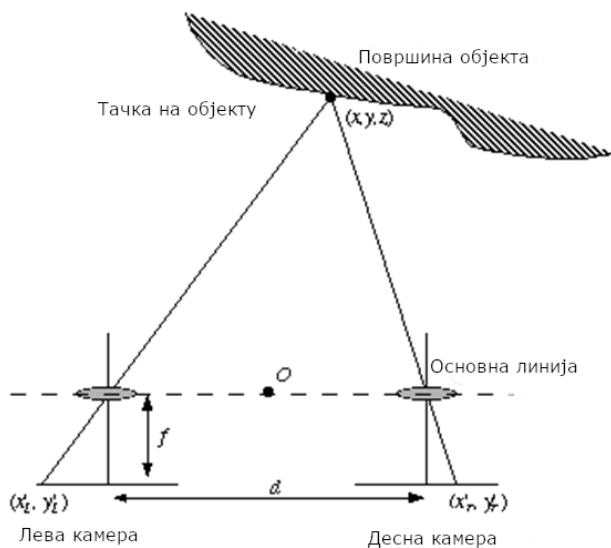
## 6.2 ПРОЦЕС СКЕНИРАЊА

Процес скенирања обухвата низ потпроцеса које треба посебно размотрити. Сваки од њих је подједнако битан за добијање потпуне слике о објекту (геометријске, физичке, термичке итд.). Фокус овог поглавља је на геометријском скенирању, и у том случају треба напоменути да постоје два основна начина аквизиције података, а то су 2D и 3D скенирање објеката. Без обзира на начин скенирања, квалитет добијених резултата у многоме зависи од типа (врсте примењене технологије, као и начина примене) скенирања, квалитета опреме која се користи, као и сложености објеката. Могу се добити веома геометријски тачни 3D модели објеката, али се могу добити и не тако квалитетни подаци, чија је даља употреба упитна. Предности компјутерске, односно софтверске обраде добијених геометријских података о објекту нам омогућавају да добијени модел скенираног објекта, путем одговарајућег софтвера (нпр. CAD или неки специфично развијен софтвер), максимално приближи стварном објекту.

**2D Скенирање** није предмет ове анализе, али потребно га је поменути због конзистентности материје. Овај начин скенирања се може најлакше објаснити ако се упореди са принципима техничког цртања. У техничком цртању се објекат који физички садржи три димензије приказује преко пројекција на папиру (који се може сматрати 2D објектом). Свака пројекција представља одређени поглед на објекат. Оваквим приступом формира се одређени број 2D слика 3D објекта. Ако се претпостави да се дати објекат слика преко неког уређаја (камера, фотоапарат, CCD

камера), то се може пренети и на дигитализацију. Камера креира 2D слике објекта из више положаја, што одговара погледима у техничком цртању. Уколико се објекат скенирања помера, камера га може „хватати“ у различитим положајима, што се опет поклапа са погледима из техничког цртања. Треба напоменути да се резултати скенирања и класичног техничког цртања углавном разликују у квалитету слике у смислу детаљности, текстура, па и у физичким и термичким својствима.

**3Д Скенирање** (аквизиција података) је процес који је тема овог поглавља. Као прво, битно је рећи да 3Д скенирање има низ предности у односу на 2Д скенирање. Најбитнија је да се при овом процесу добија потпуна слика о димензијама, величини и другим особинама објекта. Овим поступком се добија потпуна дигитална слика објекта, која се накнадно може обрађивати путем софтвера на одговарајућим радним станицама. Сам процес је веома сложен тако да ће се у овом делу представити само одређене напомене а касније ће се дати детаљнији приказ појединих метода скенирања. Као пример методе, може се искористити скенирање објекта путем две камере (тзв. Стереоскопија, енг. Stereoscory) (Слика 6-1). Овде је математички модел мало упрошћен ради лакшег разумевања принципа 3Д скенирања. Важно је разумети да се процес мора посматрати у простору, а не у равни.



**Слика 6-1** Стереоскопија и одређивање координата пројектоване тачке.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> © David Marshall 1994-1997, Introduction to Stereo Imaging – Theory, [https://users.cs.cf.ac.uk/dave/Vision\\_lecture/node11.html](https://users.cs.cf.ac.uk/dave/Vision_lecture/node11.html)

Две камере су тако постављене да су њихове оптичке осе паралелне и налазе се на растојању  $d$ . Линија која спаја сочива камере се назива основна линија. Основна линија је нормална (уз тако постављен систем) на линију погледа две камере. Оса  $x$  је тако постављена да се поклапа са основном линијом. Центар координатног система је дефинисан у тачки  $O$ , а која се налази на половини растојања између камера. Ако се пропусти два зрака ка тачки  $M(X,Y,Z)$ , добиће се одговарајуће пројекције на камери. Сliku тачке  $M$  на камерама означимо преко координата  $(x'_l, y'_l)$  и  $(x'_r, y'_r)$ . Ако са  $f$  означимо жижну даљину (даљину између центра сочива и равни слике), онда се могу написати приближне једначине на основу сличности троуглова а које гласе:

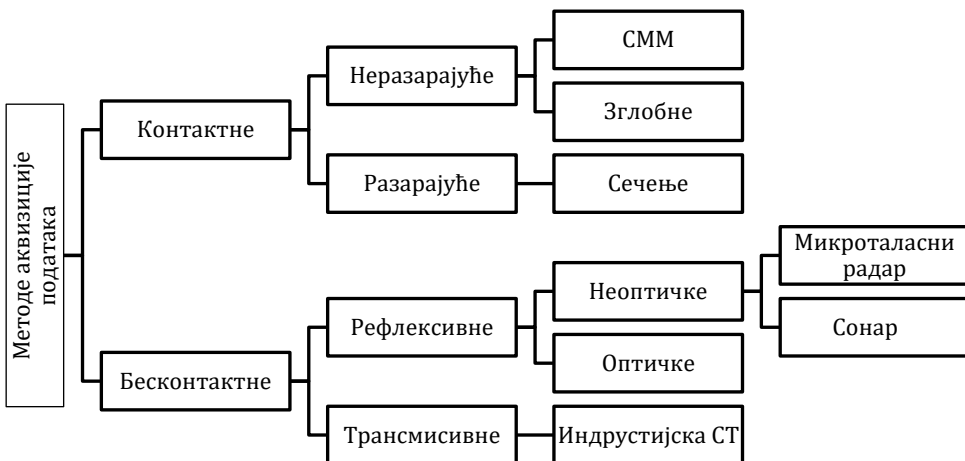
$$\frac{x'_l}{f} = \frac{x + \frac{d}{2}}{z}; \quad \frac{x'_r}{f} = \frac{x - \frac{d}{2}}{z} \quad (6.1)$$

$$\frac{y'_l}{f} = \frac{y'_r}{f} = \frac{y}{z} \quad (6.2)$$

Решавајући по  $x, y, z$  добијамо :

$$x = \frac{d(x'_l + x'_r)}{2(x'_l - x'_r)}; \quad y = \frac{d(y'_l + y'_r)}{2(x'_l - x'_r)}; \quad z = \frac{df}{(x'_l - x'_r)} \quad (6.3)$$

Овим поступком могу се добити координате сваке тачке на објекту. Ово правило генерално важи за све методе које се примењују за 3D аквизицију.



Слика 6-2 Методе за аквизицију података са физичких објеката.

Основна подела метода аквизиције података са објекта је на контактне и бесконтактне (Слика 6-2). Разлика је у томе што је код контактних метода мерни елемент у непосредном додиру са објектом мерења, док се код бесконтактних метода, углавном, користе одређене рефлективне и трансмисивне методе без директног додира са објектом скенирања. У даљем тексту биће дат само кратки опис појединих метода скенирања, док ће се више простора дати СММ технологији и њеној примени у индустрији.

### 6.2.1 БЕСКОНТАКТНЕ МЕТОДЕ

Бесконтактне методе се могу поделити на рефлективне и трансмисивне.

#### 6.2.1.1 Трансмисивне методе

1. Као **трансмисивну методу** посматраћемо компјутерску томографију (енг. Computerized tomography - CT). Трансмисивни приступ за аквизицију облика је индустријска рачунарска томографија. Код ове методе врши се озрачење објекта високоенергетским X зрацима и мерење количине (суме) зрачења која пролази кроз објекат дуж различитих линија пресека, односно региструје се слабљење зрака услед апсорпције на регистрационим сензорима (ћелијама). Предности ове методе над рефлективним методама су, углавном, неосетљивост према рефлективним особинама површине и могућност аквизиције података о унутрашњим регијама објекта које нису видљиве споља. Потенцијалне/релативне мане CT скенера су: висока цена, велике варијације у густинама материјала које могу снизити тачност, као и потенцијални ризици услед коришћења високо енергетских X-зрака.

#### 6.2.1.2 Рефлективне методе

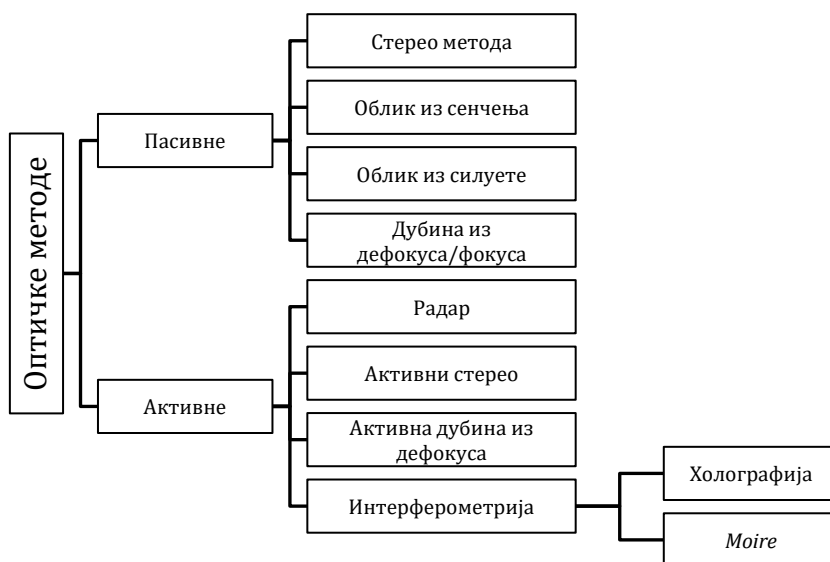
Рефлективне методе обухватају оптичке и неоптичке методе.

##### 6.2.1.2.1 Оптичке методе

Основна подела оптичких метода је на: *активне*, које користе спољашњи извор светлости и *пасивне*, које користе природне (просторне) услове осветљења (Слика 6-3).

*Пасивне оптичке методе* су методе код којих не постоји интеракција са објектом, већ се користи осветљење и стање околине. Данас се користе у индустрији, али у доста мањем обиму од активних метода.

1. Стерео метода код које се снима објекат са две камере и код које је потребно применити принцип триангулације за аквизицију података о објекту (пре свега облака тачака).
2. Облик из сенчења - Код ове методе се снимају две или више фотографија објекта путем камере. Приликом снимања, мења се интензитет осветљења у просторији. Разлике које се јављају на сликама у контрасту и јасноћи користе се за дефинисање модела објекта.
3. Облик из силуете – Снима се силуета објекта на неком огледалу које се поставља у односу на објекат. Положај огледала се мења и снима се више фотографија. Склапањем тих фотографија у целину, формира се модел објекта.
4. Дубина из дефокуса<sup>2</sup>/фокуса – објашњена у делу холографских метода.



Слика 6-3 Оптичке методе аквизиција података.

*Активне оптичке методе* - Код ових метода светлост се пројектује на објекат на структуралан начин и мерењем рефлексија од објекта

<sup>2</sup> У оптици, дефокус означава аберацију у којој је слика једноставно ван фокуса. Оптички, дефокус се односи на translацију фокуса дуж оптичке осе даље од површине детекције.



врши се одређивање облика и геометрије објекта. За разлику од пасивних и неоптичких метода, многе активне оптичке методе за мерење даљине могу брзо да узоркују велики број тачака са великом тачношћу и густином. Поред тога, оне су сигурније и јефтиније од индустријских СТ, са ограничењем да оне могу „лоцирати” само оптички видљиве делове површине.

1. Визуелни Радар (*Imaging radar*) – идентичан је микроталасном радару који ради са оптичким фреквенцијама. Показало се да ови радари дају одличне резултате за веће објекте, као што су подручја на земљи. Неколико амплитудно и фреквентно подешених радара дају могућност мерења блиских објеката. Такође, постоје и радари који не дају слику (мапу), већ одражавају нумеричке вредности неке мерне величине у одређеном подручју, као што је, на пример, електромагнетно зрачење (тзв. *Non-imaging radar*).
2. Интерферометријске методе - заснивају се на пројектовању просторног или привремено изменљивог периодичног дезена на површину, што је праћено комбиновањем рефлектованог светла са референтним ликом. *Moire*<sup>3</sup> интерферометрија користи тзв. *моар дезен* за оптичко испитивање топографије објекта пројектујући шару у виду праве решетке на објекат, а затим се рефлектујући лик посматра из другог угла. Топографија површине која се осветљава се може добити из резултујуће *моар шаре* која се формира суперпонирањем два интерферограма. Ова техника је погодна за реконструкцију површина макро објеката.
3. Холографске методе - Принципи холографије су слични принципима фотографије, само што се овде формира 3D модел објекта. Пример за то је активна/пасивна дубина из фокуса. Принцип рада је следећи - лик објекта се замути за вредност која је пропорционална растојању између тачака на објекту и равни на објекту која је у фокусу. Величина замућења се мења дуж равни слике, у зависности од удаљења тачака на објекту од равни у фокусу. Овај метод се развио и као активан и пасиван метод мерења. У другом случају, варијације у рефлектујућим особинама површине (тако звана површинска текстура) се користе за одређивање количине

---

<sup>3</sup> *Moiré* је заправо назив за врсту дезена тканине од свиле, којег одликује таласаста шара. У интерферометрији, *moire* се односи на карактеристичан лик који се добија након интерференције два светлосна лика на површини.

замућења. Стога, објекат мора имати површинску текстуру која покрива читаву површину како би се снимио облик. Квалитет снимања облика зависи од оштрине текстуре. Активне методе избегавају ова ограничења пројектовањем светлосног лика на објекат.

4. Активан стерео-метод користи две или више камера за посматрање техничких елемената на објекту. Ако се исти технички елемент посматра са обе камере, онда ће се две линије посматрања, које пролазе кроз тачку техничког елемента на равни лика сваке камере, пресећи у тачки на објекту. Као и код метода дубина из дефокуса, овај приступ се развио и као пасивна и активна стратегија мерења. Активан метод користи пројектовање светлости на објекат ради избегавања потешкоћа у дефинисању оштрине текстуре површине.

#### **6.2.1.2.2 Неоптичке методе**

У неоптичке методе спадају сонар и радар који мере растојања до објеката мерењем времена потребног да звучни или радио талас пређе пут до озраченог објекта и одбије се назад. Могу се израђивати као активни и пасивни, као и у различитим фреквентним опсезима. Радари могу да раде са фреквенцијама од 3-30 MHz, па чак и 40-300 GHz за покривање високих резолуција скенирања. Сонари који се користе за више резолуције скенирања раде у опсегу од 100-600 KHz, док се за детекцију даљих објеката могу користити таласи од неколико килохерца, до 50 KHz за детекцију на средњим даљинама.

#### **6.2.2 КОНТАКТНЕ МЕТОДЕ**

Контактне методе се могу поделити на деструктивне и недеструктивне методе:

*Недеструктивне методе обухватају:*

1. **СММ** (Computer Measuring Machine) - СММ машине су изузетно геометријски тачне, прецизне, релативно скупе и представљају стандардни алат за тачно и прецизно мерења облика у индустријској производњи. Основни елементи су: проба са пипком, рачунар који бележи мерења и склоп машине. СММ машине ће бити детаљније обрађене у посебном делу овог поглавља.
2. **Зглобни механизми** - Често су пратећа опрема других машина и уређаја, посебно СММ машина. Састављени су из више осовина међусобно повезаних зглобовима тако да формирају један кине-

матски ланац. На самом крају, односно задњој осовини, имају сонду која детектује облик површине приликом кретања по њој и преноси координате тачака ка рачунару који обрађује податке.

*Деструктивне методе обухватају:*

1. **Метода сечења/раздвајања/деформације** је, заправо, метода којом се део сече, раздваја и деформише на неки начин употребом неке од производних технологија. Ова метода се примењују једино у случају када је изузетно тешко да се осталим методама добије унутрашња геометрија дела.

### 6.3 КООРДИНАТНЕ МЕРНЕ МАШИНЕ

Координатне мерне машине (*Coordinate Measuring Machines - CMM*) су стандардне индустријске машине намењене мерењу геометрије дела, односно одступања мера у односу на дефинисане димензије производа. Мерења се врше сондирањем површине објекта и аквизицијом 3D просторних тачака (XYZ-координате) на површини мереног дела. СММ може да се користи како за мерење у простору, тако и за мерење у равни (2D).

СММ, углавном, могу да користе два начина мерења, односно два основна приступа, а то је коришћење тактилне сонде и оптичког мерног система. Тактилни СММ су углавном тачнији, па се често користе и за верификацију оптичких мерења. Данашњи СММ системи су достигли изванредну тачност, како и за тактилне системе, тако и за оптичке системе уз коришћење ласерског скенирања и камера високе резолуције.

Главни ISO стандарди који регулишу СММ су ISO 1060 и ISO 15530. ISO 10360 је за верификацију перформанси СММ. Стандард ISO 15530 служи за одређивање мерне непрецизности добијене из СММ-а.

Генерално, постоје две врсте СММ класификације:

1. класификација заснована на координатном систему који користи СММ – већина тактилних СММ користе картезијански координатни систем (Декартов систем, до 6-оса), док некартезијанске системе, код којих се употребљавају други типови координатних система, углавном користе оптички (нетактилни) СММ системи, осим СММ-а са зглобном руком;
2. класификација заснована на интеракцији између СММ-а и површине дела:
  - 2.1. тактилне, које имају физички додир са површином дела – директан контакт са површином дела омогућава тачнија и прецизнија,

али, углавном, знатно спорија мерења, ограничена величином пречника сфере сонде (То значи да, ако се користи сонда са сферним крајем пречника 2 mm, онда није могуће мерити отворе мање од 2 mm); такође, због директног контакта сонде и објекта мерења могуће је доћи до клизања сонде, као и до деформације дела што се спречава мањом притисном силом; предност тактилног мерења је у лакшој реконструкцији мерене површине, односно могуће је креирати аналитички модел, што знатно унапређује резултате мерења и подиже ниво сигурности у измерене податке;

- 2.2. оптичке, које користе неку од оптичких мерних метода за формирање облака тачака са мерне површине, као што је, на пример, *фотограмetriја*. Оптички системи захтевају извор светлости (ласер) за формирање усмерених зрака светлости и систем камера које хватају рефлектовану светлост са мерне површине. Алгоритми обраде добијених података су несигурнији у односу на тактилни СММ, а и лоше обрађене површине могу правити проблем у рефлексији, стварањем шума, који је потребно уклонити. Такође, материјал објекта мерења може да утиче на избор мерног система, односно оптике. Данашњи системи су знатно напредовали, како са софтверске, тако и са хардверске стране, па су одступања мера сведена на најмању могућу меру, али и даље су, генерално, тактилни системи тачнији и поновљивост мерења је боља (прецизнији су).

Приликом одабира СММ-а, који задовољава потребе производног процеса, важно је обратити пажњу на следеће особине: тачност СММ-а, карактеристике мерне опреме СММ-а, софтвер СММ-а, могућност узорковања СММ-а и додатне аспекте (простор, употребљивост, поновљивост).

### 6.3.1 Тачност СММ-а

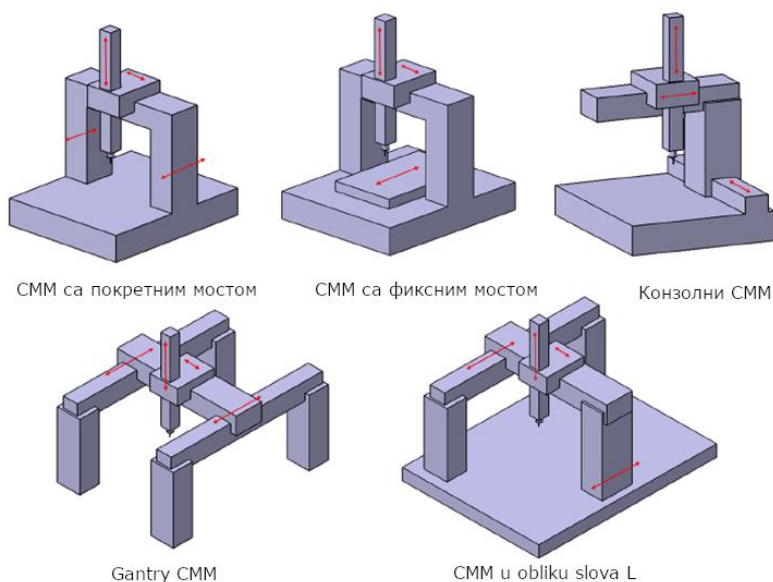
Тачност СММ дефинисана је према стандарду ISO 10360 и дефинисана је као максимално дозвољена грешка (енг. *Maximal Permissible Error* - *MPE*). *MPE* је дефинисана формулом:

$$MPE = \pm X + \frac{L}{K} \quad (6.4)$$

где је: *X* је мера тачности (дужинска мера у  $\mu\text{m}$ ), *K* је константа, а *L* је измерена дужина у mm.

Да би се дефинисала МРЕ, потребно је извршити верификациону процедуру за сваку СММ, дефинисану према ISO 10360 стандарду. Осим тачности СММ, важно је дефинисати и несигурност мерења СММ-а јер она итекако утиче на тачност мерења. Несигурност мерења СММ-а је последица лоше калибрације машине, неправилног одржавања, температурних дилатација и слично. У суштини, најбоље је ако СММ има високу тачност, а малу несигурност мерења.

### 6.3.2 КОНСТРУКТИВНА ИЗВОЂЕЊА КАРТЕЗИЈАНСКИХ СММ-А



Слика 6-4 Конструктивна извођења картезијанских СММ-а.<sup>4,5</sup>

#### *СММ са покретним мостом*

Овај тип СММ-а је најчешћи тип који се налази у индустрији и лабораторијама. Популарност овог типа конструктивног решења се огледа у комбинацији неколико важних карактеристика и то: висока тачност мерења, релативно велика брзина мерења (у поређењу са другим типовима картезијанских СММ-а) и могућност мерења делова разних облика и величина. Овај тип СММ-а има два стуба која се крећу заједно у једном правцу или по једној оси. Остале две осе се дефинишу кретањем моста у

<sup>4</sup> Robert J. Hocken, Paulo H. Pereira, Coordinate Measuring Machines and Systems, 2016, CRC Press, ISBN-13: 978-1138076891

<sup>5</sup> Wasy Research © 2023, <https://www.wasyresearch.com/coordinate-measuring-machine-cmm-an-introduction-types-considerations-and-applications/>, Датум задњег приступа: 20.01.2023.

два управна правца. Покретни мост има феномен „ходања” (у микрометарском или мањем обиму), када се два стуба не померају тачно у исто време. Овај феномен „ходања” доноси грешке посебно за ову врсту СММ-а.

#### *СММ са фиксним мостом*

Овај тип картезијанског СММ-а има највећу тачност међу свим осталим картезијанским СММ-има. Од 2017. године, ниво тачности ове врсте СММ-а може постићи  $\pm(0.3+L/1000)$   $\mu\text{m}$  где је  $L$  (мерна дужина) дата у милиметрима. Међутим, овај СММ има најмању брзину мерења у поређењу са било којим другим картезијанским СММ-ом. Конструктивно, садржи два фиксна стуба, док основно померање изводи сто и мерна глава. СММ са фиксним мостом нема феномен „ходања”, као што је то код СММ-а са покретним мостом. Овај аспект је један од разлога зашто СММ са фиксним мостом има већу тачност од СММ са покретним мостом.

#### *Конзолни СММ*

Конзолни СММ се врло често може наћи у аутомобилској индустрији. Овај тип СММ-а се углавном користи за мерење каросерије склопљених аутомобила. Конзолни СММ са дугачком мерном руком се користи за приступ и мерење често недоступних површина са шупљи-нама (као што је каросерија аутомобила). Међутим, конзолни СММ има ниску тачност у поређењу са СММ-ом са покретним и фиксним мостовима, јер конзолна рука изазива ефекат савијања када је рука у најдаљој позицији. Овај ефекат савијања доприноси грешкама у мерењу и смањује тачност СММ-а.

#### *Гантри СММ*

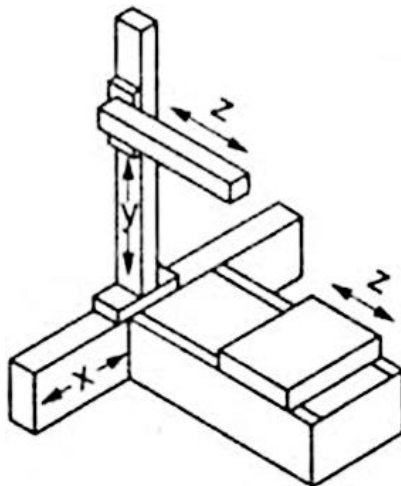
Ова врста СММ-а има највећу мерну запремину. Углавном се овај тип СММ-а користи за мерење делова величине  $> 10\text{m}$ . Међутим, овај тип СММ-а има најнижу тачност мерења у поређењу са другим картезијанским СММ-има. С обзиром на то да има веома велику мерну запремину, геометријска грешка (волуметријска грешка) доприноси ниској тачности и поновљивости мерења.

#### *СММ у облику слова L*

СММ у облику слова L је најнеобичнији СММ у поређењу са другим картезијанским СММ-има, јер је дизајниран да мери делове врло специфичног облика. Стуб у облику слова L служи да смањи ефекат савијања конзолне руке.

### *СММ у са хоризонталном руком*

СММ са хоризонталном руком оријентише сонду хоризонтално. Ове машине се користе за мерење дугих, витких делова, који би, иначе, били ван домета типичне СММ, али њихова тачност је мања у односу на друга конструктивна решења (Слика 6-5).



Слика 6-5 СММ са хоризонталном руком.

### **6.3.3 КОНСТРУКТИВНЕ ОДЛИКЕ НЕКАРТЕЗИЈАНСКИХ СММ-А**

Овај тип СММ-а није заснован на Декартовом просторном координатном систему. Некартезијански СММ се базира на употреби цилиндричних или сферних координатних система. Још једна карактеристика некартезијанског СММ-а је у томе да се овај СММ не помера када се врши мерење (на пример систем фотограметрије и СТ скенирања).

Некартезијански СММ се, такође, дели на *контактне (тактилне)* и *бесконтактне (оптичке)* системе. На пример, контактни некартезијански СММ је са зглобном руком. Бесконтактни некартезијански СММ су и ласерски даљиномери, фотограметрија, стереоскопија.

СММ са зглобном руком има цилиндрични координатни систем, а ласерски даљиномер има сферни координатни систем (Слика 6-6). Фотограметрија је метода која подразумева фиксирање објекта, као и апаратуре мерења. Врло често се некартезијански СММ заснивају на бесконтактном (оптичком) систему, осим СММ-а са зглобним краком који је контактни (тактилни) систем. Генерално, некартезијански СММ имају нижу тачност у поређењу са картезијанским СММ-ом, осим система базираних на ласерском мерењу, који могу бити веома високе тачности.





**Слика 6-6** CMM са зглобном руком  
(преузето са <https://industry.nikon.com/en-gb/> )

#### **6.3.4 КАРАКТЕРИСТИКЕ МЕРНЕ ОПРЕМЕ СММ-А**

Постоји неколико карактеристика СММ-а са аспекта мерне опреме које треба узети у обзир, а то су: радна запремина, тежина дела који се мери, брзина мерења и тип сензора. Брзина мерења је директно условљена типом мерног инструмента (контактно или бесконтактно мерење), као и начином узимања узорка. Специфичност тактилног мерења је у могућности мерења тачку по тачку, што је спорије али тачније, или континуално по дефинисаној путањи, што је брже, али може бити мање тачно јер, услед повећања брзине мерења, покретни системи машине подлежу динамичким променама. Тип сензора је већ поменут и, у суштини, у индустрији је већа примена тактилног мерења у односу на оптичко.

#### **6.3.5 СОФТВЕР СММ-А**

Карактеристике софтвера СММ-а се могу поделити према начину: програмирања, корисничког интерфејса, начину евалуације измерених тачака, интерфејсу размене података, као и излазним форматима.

*Програмирање СММ* се своди на начин како ће се контролисати мерна опрема која врши мерење тачака на површини дела. Иначе, постоје три начина: метод учења (када се сонда доводи у позицију мерења а контролер памти путању до свих мерних тачака, па је могуће поновити мерење), параметарско програмирање (формира се параметарски мерни модел који се може прилагођавати фамилији делова) и *CAD* програми-

рање (када се користи претходно креиран 3D модел производа који се употребљава за проверу мера на произведеном делу).

*Кориснички интерфејс* зависи од произвођача машине и, углавном, сви софтвери користе сличан интерфејс, али имају и своје специјалне карактеристике. Неки од произвођача софтвера су: Zeiss, Mitutoyo, Leitz, Brawn and Sharpe, DEA.

*Евалуација добијених података* је процес у коме је потребно представити измерене величине на одређени начин и искористити за проверу дефинисаних мера (према CAD моделу или према утврђеној путањи). Сам процес обраде облака измерених тачака се назива *фитовање* или *уклапање (fitting)* и постоји велики број алгоритама који се могу користити, као што су - метод најмањих квадрата или метод слободних површина базиран на NURBS или некој другој технологији (*подељене површине*<sup>6</sup>, на пример). Свако *фитовање* има одређену грешку, па и њу треба укључити у анализу када се посматрају добијени подаци и тачност објекта мерења.

*Интерфејс метод за размену података* је начин како се измерени подаци преносе на други рачунар или у други софтвер на даљу обраду. То може бити путем рачунарске жичне или бежичне мреже, серијским преносом или помоћу хардверског меморијског медијума (USB Flash меморија).

*Излазни формати података* су формати података који управљачка јединица машине може да произведе и пренесе на даљу обраду. Један од најчешћих формата је *облак тачака*, односно ASCII текстуална датотека са унетим X,Y,Z координатама. Ако софтвер машине дозвољава, могуће је креирати и комплексније датотеке као што су датотеке са полигоналним форматима (*stl, obj*). Уколико је потребно радити даљу обраду тачака, односно применити методе реверзног инжењеринга, најбољи формат је изворни формат, односно текстуална датотека, јер се над тим подацима не примењују никакве методе обраде (оптимизација, трансформација).

## 6.4 ПОСТУПАК СКЕНИРАЊА ГЕОМЕТРИЈЕ

Савремене технике производње захтевају квалитетан 3D модел производа као основу за различите САх активности у процесу пројектовања производа и производње. У неким случајевима није лако креирати 3D геометријски модел само коришћењем програма за пројектовање, јер су облици превише сложени. Ово је често случај са пројектовањем наки-

---

<sup>6</sup> *Subdivision surfaces*

та, аутомобила или сличних производа код којих је топологија резултат уметничког израза дизајнера. У таквим случајевима дизајнер ствара физички модел (прототип). Креирање рачунарског 3D геометријског модела на основу овог прототипа је могуће само коришћењем техника реверзног инжењерства. Производња варалица за риболов спада у претходно поменућу категорију производа. Искусни дизајнер ручно обликује прототип, али је за даље пројектовање алата потребан 3D геометријски модел варалице. Коришћењем техника реверзног инжењерства, могуће је добити 3D геометријски модел, али је, притом, потребно решити низ практичних проблема као што су:

1. избор методе скенирања (контактне или бесконтактне методе);
2. избор уређаја за скенирање;
3. начин постављања објекта у уређај (једнострано, двострано или вишестрано скенирање) и
4. корак скенирања.

#### 6.4.1 ДЕФИНИСАЊЕ ПАРАМЕТАРА СКЕНИРАЊА

Избор методе скенирања врши се на основу материјала и топологије физичког модела. У овом случају физички модел (прототип) кашике варалице начињен је од ацетатне целулозе (врста пластике). Тврдоћа површине овог модела дозвољава да се за скенирање изабере контактна метода. Такође, топологија прототипа, иако врло комплексна, таква је да мерни пипак може приступити свим тачкама на његовом омотачу. Димензије прототипа су 26 x 14 x 49 mm (B x H x L), па је за скенирање изабран уређај Roland MDX-20 (Табела 6-1) који ради на контактном принципу и најсличнији је CMM-у.

**Табела 6-1** Подаци о машини Roland MDX-20.

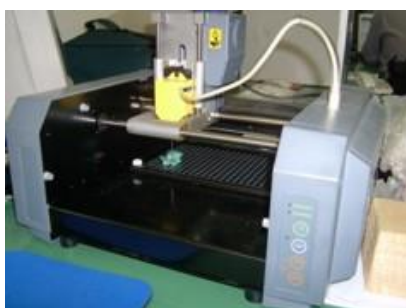
МОДЕЛ	MDX-20
ХУ величина стола	8-5/8"(X). x 6-1/4"(Y) ,(220 mm x 160 mm)
Максимална величина за рад	8 "(X) x 6 " (Y) x 2-3/8" (Z), (203.2mm x 152.4mm x 60.5mm)
Интерфејс	Serial (RS-232C)
Спољне димензије	476.8 mm x 381.6 mm x 305 mm

У табели (Табела 6-2) дати су подаци везани за могућности уређаја приликом скенирања објеката.

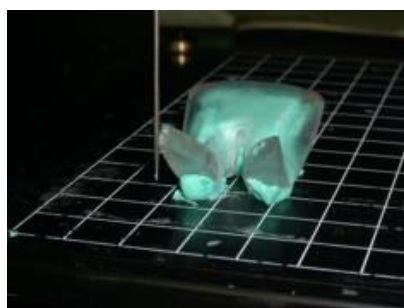
**Табела 6-2** Подаци о машини везани за могућности скенирања.

Сензор	Roland Active Piezo Sensor (R.A.P.S.) дужина сонде 60 mm, пречник врха 0.08 mm
Метод скенирања	Скенирање
Корак скенирања	X/Y-осе. Од 0.05 до 5.00 mm. Корак 0.05 mm. Z-оса 0.025 mm
Брзина скенирања	4 - 15 mm/s.
Извоз у формате	DXF, VRML, STL, 3DMF, IGES, Grayscale, Point Group and BMP

Након анализе модела, дефинисања машине скенирања, потребно је дефинисати начин постављања модела на машину и дефинисати параметре скенирања (пре свега се мисли на тачност скенирања). Правилно постављање модела је врло битно за сам процес скенирања, али и за каснију обраду података. Модел кашике варалице није симетричан па захтева да се скенирање изврши са две стране: горње и доње. Машина са постављеним моделом је приказана на слици (Слика 6-7).



а)



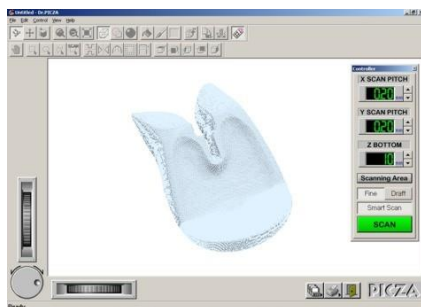
б)

**Слика 6-7** Стона СММ са објектом чија геометрија се утврђује у мерном простору машине (а) и приказ пипка/сонде у операцији утврђивања геометрије предмета (б).

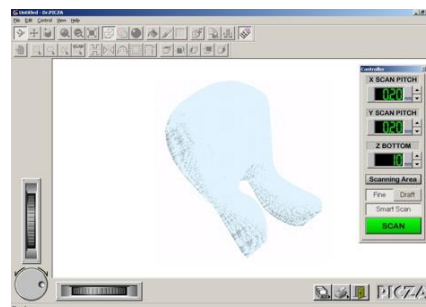
На слици 6-7 -б, види се да објекат одликује сложена геометрија и топологија, па је у циљу добијања квалитетног рачунарског модела потребно извршити скенирање са малим кораком у правцу X и Y осе. На основу искуства у скенирању сличних модела изабран је корак за скенирање од 0.2 mm.

За управљање радом уређаја за скенирање коришћена је рачунарска програмска апликација Dr. PICZA, у оквиру које се могу подесити сви параметри скенирања. На сликама 6-8 -а и -б приказани су резултати добијени скенирањем и приказани у програму Dr. PICZA. Резултати ске-

нирања су, у ствари, координате скупа тачака на омотачу модела (*облак тачака*).



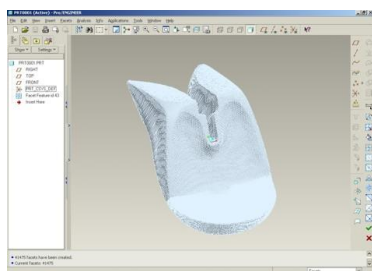
а)



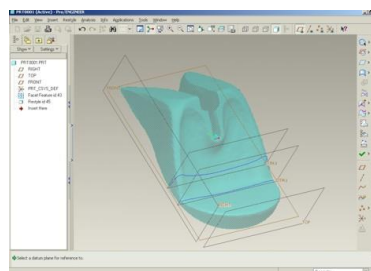
б)

**Слика 6-8** Скенирани модел објекта (предмета за мерење) са горње стране (а) и са доње стране (б).

Тачке спољашње површине објекта (са доње и горње стране) су успешно скениране и искоришћене за формирање тесалационог (мозаичког) модела површине објекта од великог броја малих површина (*facet-a*) које су најчешће у облику троугла. Програм Dr. PICZA има могућност извоза модела у више формата: *stl*, *igs*, *txt* и др. За овај случај изабран је *stl* формат. Модел је увезен у посебан CAD модул Pro/ENGINEER PLM софтвера<sup>7</sup>, тзв. *Facet*. У овом кораку, врши се тзв. *оздрављење* тесалационог (мозаичког) модела површине, што подразумева неколико операција попут рафинације, уклањања и допуне мозаичких елемената (Слика 6-9 -а). Након оздрављења тесалационог модела површине, геометрија модела се даље регенерише у модулу *Restyle* у коме се креирају потребне криве за креирање валидног површинског модела. *Restyle* модел са креираним кривама је приказан на слици (Слика 6-9 -б).



а)



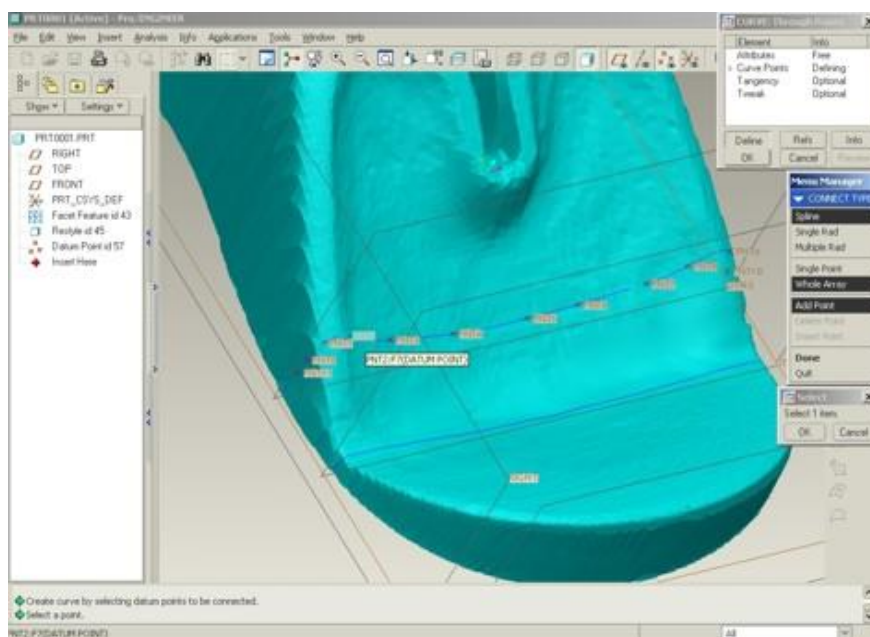
б)

**Слика 6-9** Приказ дигиталног модела геометрије објекта који је мерен (а) након формирања мозаичке мреже

<sup>7</sup> Pro/ENGINEER је ранији назив за PTC Creo Parametric PLM софтвер.

тетраедарских елементарних површина и (б) након „оздрављења” геометрије мозаичког модела.

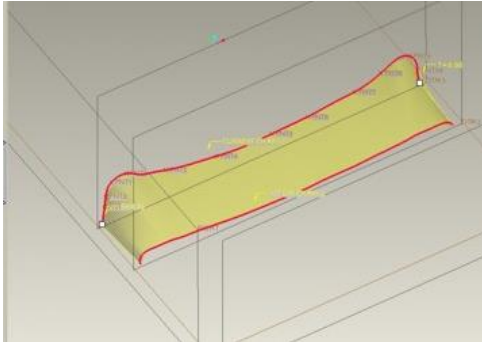
Криве које се формирају у *Restyle* модулу се формирају над тесалационим моделом и оне служе као конструкционе, привремене криве за формирање ободних кривих површинског модела објекта. Након добијања конструкционих кривих, врши се формирање нових кривих са одговарајућим степеном непрекидности и глаткости. Постоји више начина за формирање ободних кривих површинског модела објекта, а један од њих, који је овде примењен, користи поједине тачке на привременим кривама кроз које се „провлаче” сплајн-криве. Тај поступак је приказан на слици (Слика 6-10).



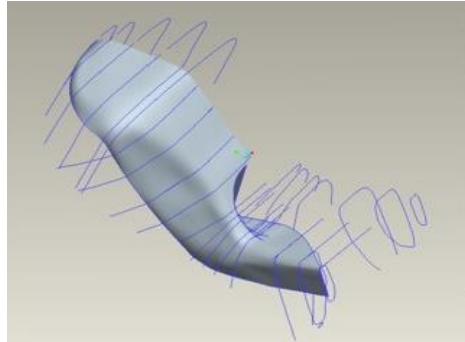
**Слика 6-10** Приказ секвенце формирања ободних кривих површинског модела над тачкама привремених конструкционих кривих.

Након креирања потребних ободних кривих, формира се површина коришћењем функције *Boundary blend* (Слика 6-11 -а). Овај алат је доста једноставан за добијање површина, под условом да су криве правилно дефинисане и усаглашене (исти број тачака, правилна закривљеност, тангентност). Површина се може креирати у деловима или се може креирати у целини. Доња површина модела (Слика 6-11 -б) је креирана истом функцијом (*Boundary blend*), с тим да су коришћене све ободне криве које су претходно формиране. Тако добијена површина повољна је

за каснију припрему за обраду, јер је остварена континуалност закривљења површине.



а)

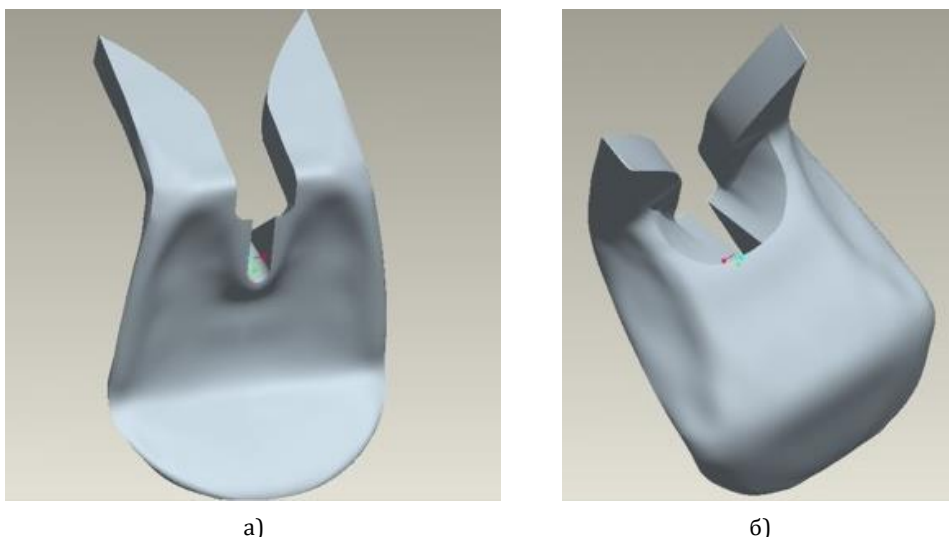


б)

**Слика 6-11** Формирање површине на основу кривих (а) и приказ измоделиране доње површине објекта који је скениран у поступку реверзног моделирања (б).

Након обраде доње и горње површине модела, извршено је склапање модела у целину (Слика 6-12 -а и -б). Склапање модела је извршено преко криве раздвајања која је дефинисана на тај начин што је прво креирана горња површина, па је на њој креирана спољна гранична крива. Дата крива је пресликана на доњу површину и њоме је ограничена површина доње стране. Пошто су и доња и горња страна ограничене истом кривом, састављање модела у целину је извршено по тој кривој. Након састављања доње и горње површине, добија се 3D геометријски модел кашике варалице.





а)  
б)  
**Слика 6-12** Приказ склопа доње и горње површине,  
поглед с горње стране (а) и поглед с доње стране (б).

## 6.5 ПОСТУПАК МОДЕЛИРАЊА ОПЕРАЦИЈА МЕРЕЊА ГЕОМЕТРИЈЕ ПОМОЋУ **CAPP/CAM** АПЛИКАЦИЈЕ

За разлику од мерења геометрије на СММ машинама, када је потребно обавити утврђивање координата тачака свих површина или већих површина предмета мерења на НУ машинама за машинску обраду, операције и захвати мерења геометрије имају улогу аутоматизованих помоћних захвата контроле. СММ машине су специјалне НУ машине чија је примарна намена: 1) да се утврди одступање реалне геометрије предмета мерења од идеалног *CAD* модела тог предмета или 2) да се скенира читава геометрија ради реконструкције (реверзног моделирања) геометрије предмета (види претходно потпоглавље). Коришћење НУ машина за машинску обраду, попут глодалица и стругова, за обављање мерење геометрије попут СММ машина је несврсисходно, осим ако је потребно унапредити ефикасност помоћних захвата контроле обраде аутоматизацијом мерења. Заправо, захвати мерења геометрије на НУ машинама за обраду се спроводе у следећим ситуацијама:

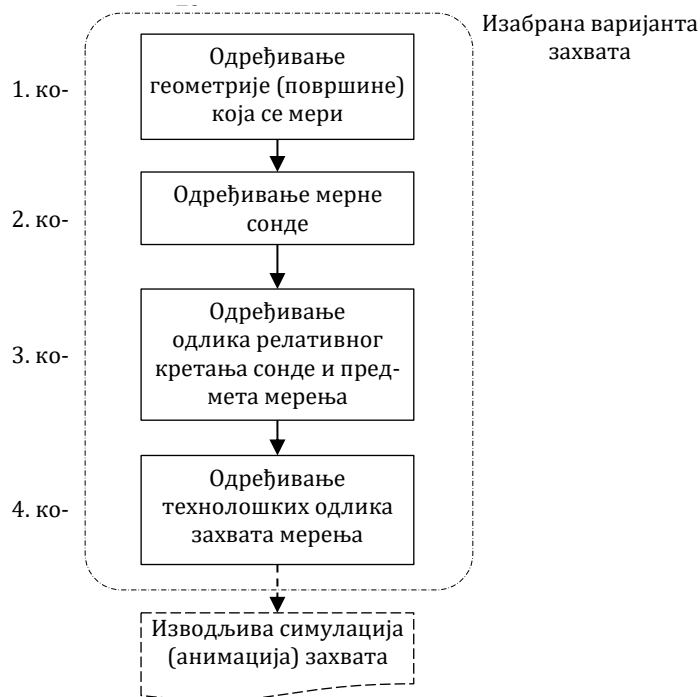
1. приликом „умеравања” припремка, односно када се жели утврдити геометријско место припремка у радном простору машине;
2. приликом „умеравања” обратка, односно када се жели утврдити геометријско место обратка у радном простору машине - ова ситуација је уобичајена приликом промене *стежања* обратка

(промена оријентације и позиције у радном простору НУ машине) и

3. приликом контроле ваљаности геометрије обратка која је добијена у току спровођења претходних захвата обраде.

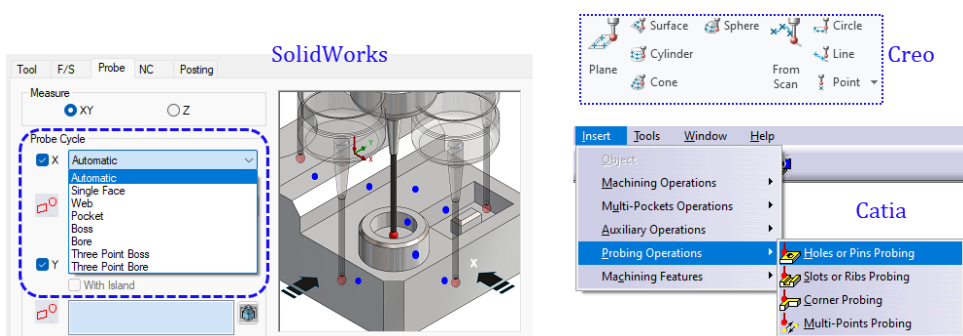
Ове врста захвата се може моделирати у истој *CAPP/CAM* апликацији у којој се врши моделирање самих захвата обраде. Моделирање захвата мерења започиње на скоро исти начин као и у случају моделирања захвата обраде резањем (Слика 6-13).

0. корак – избор варијанте захвата



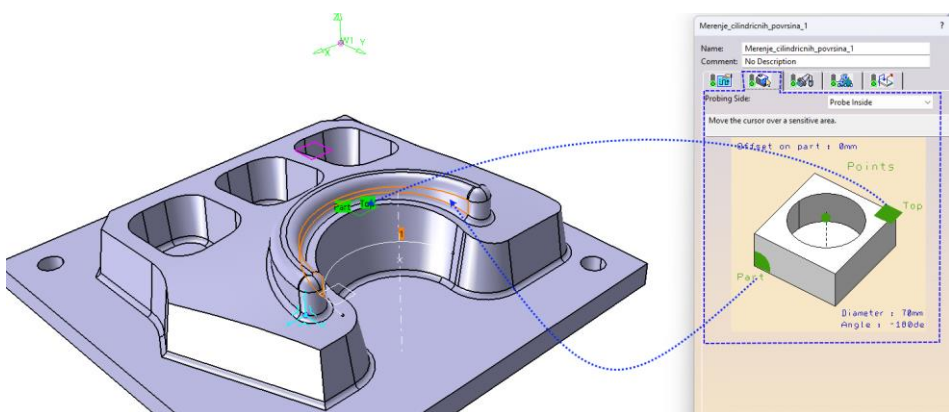
**Слика 6-13** Општи алгоритам моделирања захвата мерења.

На првом кораку је потребно осмислити и испланирати захват мерења у складу са оријентацијом обратка и начином стезања. Одлуке, у вези са тим, у највећој мери зависе од тога који део геометрије предмета се жели мерити. Наредни корак подразумева избор одговарајућег захвата мерења између више варијанти захвата мерења које нам *CAPP/CAM* апликација нуди (тзв. *probe cycles*) - Слика 6-14.



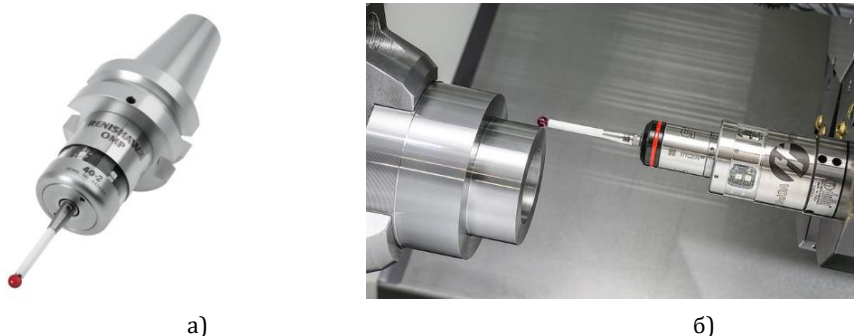
**Слика 6-14** Приказ спремљених варијанти захвата мерења геометрије у CAM модулима SolidWorks, Creo и Catia софтвера.

Следећи корак се односи на избор *геометрије од интереса*, односно избор површине чија се геометрија жели проверити (номиналне мере, облик). Притом, врши се подешавање граница простора у коме ће се обавити мерење, што ће утицати на формирање путање сонде (Слика 6-15).



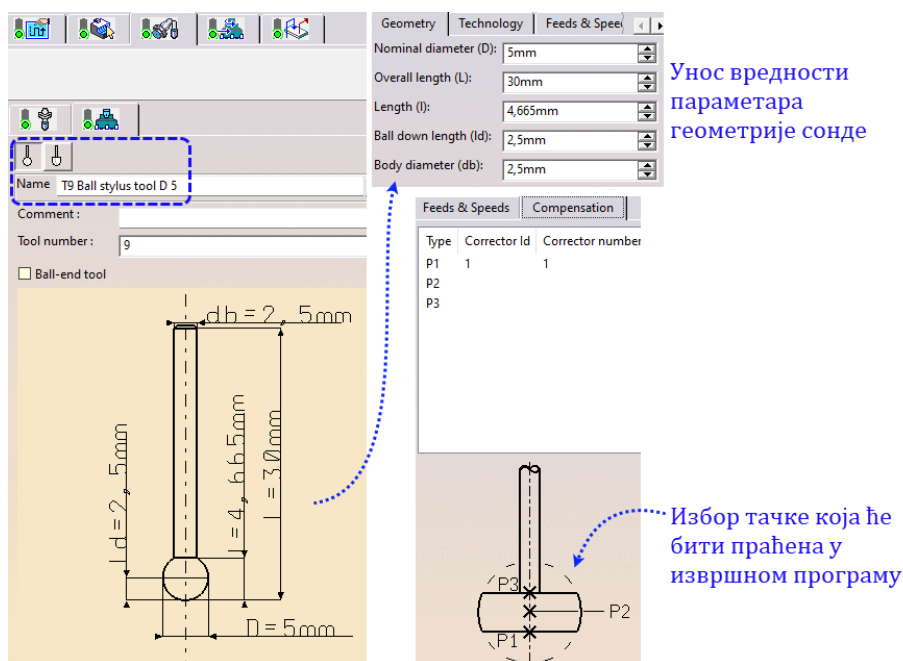
**Слика 6-15** Избор површине која се мери.

Операције мерења геометрије на НУ машинама за обраду резањем (нпр. глодалице, стругови) се изводе помоћу посебних врста алата, тзв. мерних сонди са *Stylus* врхом (*probe tool*) - Слика 6-16. При моделирању захвата мерења, потребно је прецизно утврдити одлике геометрије мерне сонде која ће се користити. Као и у случају резних алата, уколико постоји збирка алата, могуће је изабрати неки од постојећих модела сонди и са њим учитати све вредности параметара геометрије сонде. Уколико се, међутим, сонда користи први пут, потребно је унети вредности параметара геометрије сонде и адаптера.



Слика 6-16 Мерне сонде са тзв. *Stylus* врхом (куглицом).<sup>8</sup>

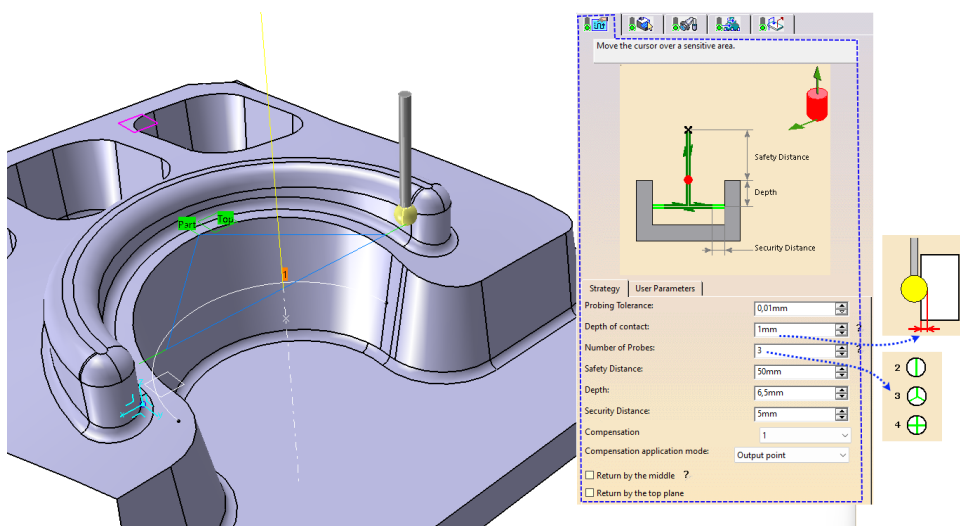
(а) мерна сонда са адаптером за стезање на глодалици и  
(б) контрола геометрије обратка након стезања у стезну главу струга.



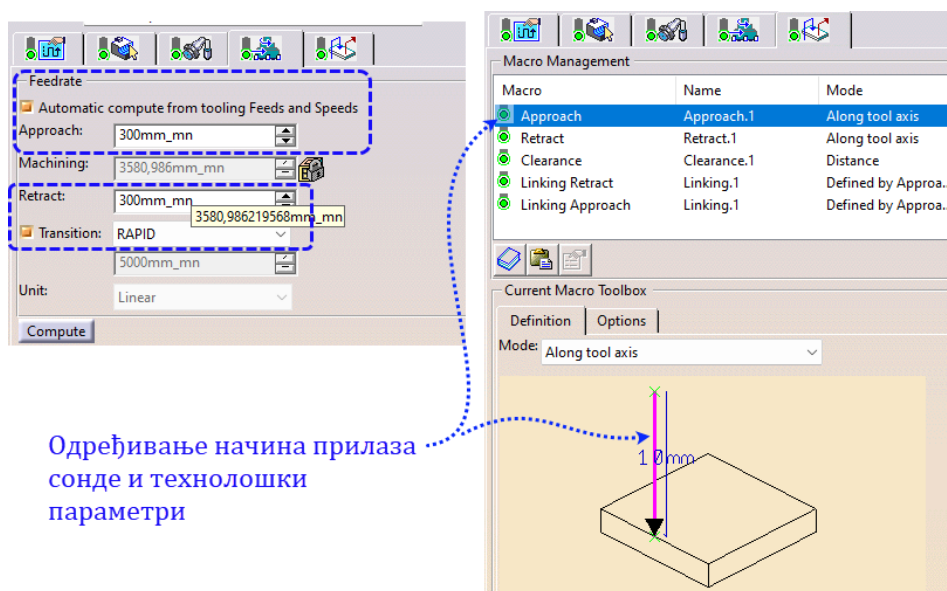
Слика 6-17 Подешавање одлика мерне сонде.

Следи избор начина мерења и подешавање одлика путање мерне сонде (релативног кретања сонде и обратка) - Слика 6-18. Уједно, потребно је дефинисати помак и подешавање одлика помоћних, улазно-излазних кретања сонде (Слика 6-19).

<sup>8</sup> Преузето са <https://www.haascnc.com/productivity/probe-system/wips-l.html> и <https://www.renishaw.com/resourcecentre/pt/details/omp40-2-inspection-probe--11465>

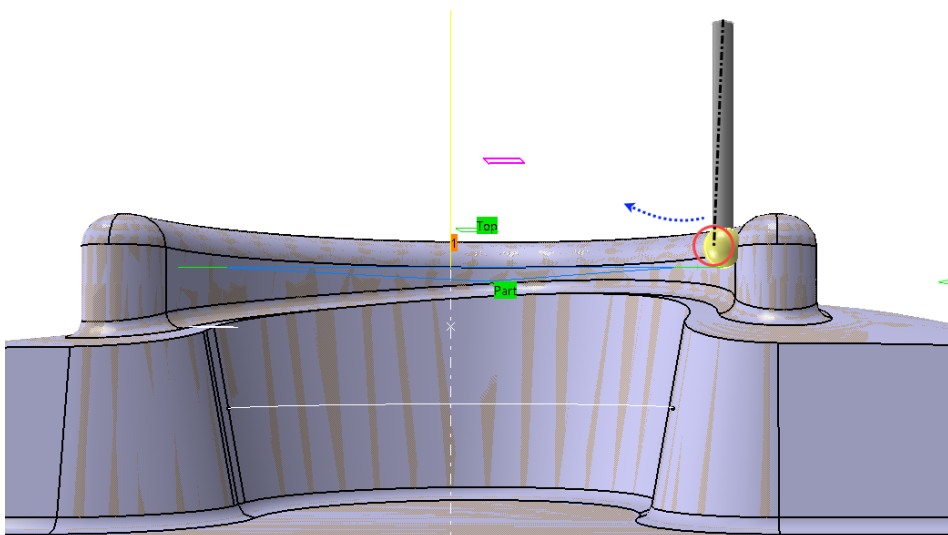


Слика 6-18 Подешавање одлика путање сонде.



Слика 6-19 Приказ секвенце у којој се задају вредност помака и дефинишу параметри улазно-излазних кретања.

Након формирања захвата, може се обавити симулација путање алата и, по потреби, унети додатна постпроцесорска инструкција.



**Слика 6-20** Приказ „уласка“ *Stylus* врха сонде у материјал: моделирано је да се сонда заустави када оса сонде пређе циљану површину 1mm. Заправо, у пракси, доћи ће до савијања врата сонде.

Коначно, након провере изводљивости и ваљаности моделираног захвата мерења, могуће поново покренути процедуру израде извршног програма која ће, овог пута, укључити и „циклус“ или захват мерења геометрије. У извршном програму наћи ће се и циклус мерења.

```

LOAD/TOOL,11
COOLNT/
$$ TOOLCHANGEEND
$$ End of generation of : Tool Change.8
$$ OPERATION NAME : Holes Probing.2
$$ Start generation of : Holes Probing.2
RAPID
GOTO / 90.00000, 135.00000, 22.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
RAPID
GOTO / 90.00000, 135.00000, 20.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
FEDRAT/ 300.0000,MPPM
GOTO / 90.00000, 135.00000, 10.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
CYCLE/PROBING_HOLE, 70.000000, 5.000000
GOTO / 90.00000, 135.00000, 0.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
CYCLE/OFF
FEDRAT/ 1000.0000,MPPM
GOTO / 90.00000, 135.00000, 20.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
RAPID
GOTO / 90.00000, 135.00000, 22.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
$$ End of generation of : Holes Probing.2
$$ OPERATION NAME : Tool Change.14
$$ Start generation of : Tool Change.14
$$ TOOLCHANGEBEGINNING
CUTTER/ 10.000000, 0.000000, 5.000000, 2.886751, 30.000000,$
0.000000, 50.000000
$$ Select sequence 1 to exclude tool compensation
APPLY/MILL
APPLY/TOOL

```

**Слика 6-21** Део извршног програм у АРТ формату који се односи на мерење геометрије.

## ЛИТЕРАТУРА

- Chevalier, F. (2002). *Principles of Radar and Sonar Signal Processing*. Artech House. ISBN: 978-1630812294
- Dassault Systemes. (2018). CATIA Version 5-6 Release 2018 Documentation.
- Dassault Systemes. CATIA - NC Manufacturing.
- Haleem, A., & Javaid, M. (2019). 3D scanning applications in medical field: A literature-based review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7(2), 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006>
- Hocken, R. J., & Pereira, P. H. (2017). *Coordinate Measuring Machines and Systems* (2nd ed.). CRC Press. ISBN: 978-1138076891
- Majstorovic, V., Trajanovic, M., Vitkovic, N., & Stojkovic, M. (2013). Reverse engineering of human bones by using method of anatomical features, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1), 167-170. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.081>
- Marshall, D. (1997). Introduction to Stereo Imaging – Theory. Retrieved February 28, 2023, from [https://users.cs.cf.ac.uk/dave/Vision\\_lecture/node11.html](https://users.cs.cf.ac.uk/dave/Vision_lecture/node11.html)
- Meguellati, S. (2020). Precision inspection of micro components free form by Moiré interferometry, *Proc. SPIE 11352, Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology*, 1135219. <https://doi.org/10.1117/12.2554692>
- Mian, S. H., & Al-Ahmari, A. (2014). New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 5(1). <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2014001>
- Murakami, H., Katsuki, A., Sajima, T., & Fukuda, M. (2016). Reduction of Liquid Bridge Force for 3D Microstructure Measurements. *Applied sciences*, 6(5), 153. <https://doi.org/10.3390/app6050153>
- eFunda, I. (n.d.). Rapid prototyping: An overview. Retrieved February 28, 2023, from [https://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/intro.cfm](https://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm)
- Samczynski P., & Giusti E. (2021). *Recent Advancements in Radar Imaging and Sensing Technology*. Sensors, MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0919-8>
- Sui, C., He, K., Lyu, C., Wang, Z. & Liu, Y. H. (2020). Active Stereo 3-D Surface Reconstruction Using Multistep Matching. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(4), 2130-2144. 10.1109/TASE.2020.2991803
- Suga, N. (2006). *Metrology the science of measurement Handbook* (2nd ed.). Mitutoyo. <https://www.mitutoyo.com/files/standard/MetrologyHandbook/html5/index.html?&locale=ENG>
- Tsang, P., Poon, T. C., & Liu, J. P. (2016). Adaptive Optical Scanning Holography. *Sci Rep* 6, 21636. <https://doi.org/10.1038/srep21636>
- Syam, W. (2022, June 20). CMM: An introduction, types, considerations, applications. Wasy Research. Retrieved February 28, 2023, from <https://www.wasyresearch.com/coordinate-measuring-machine-cmm-an-introduction-types-considerations-and-applications/>
- Weng, Q., Panchal, V., Lin, K. T., Sun, L., Kajihara, Y., Tzalenchuk, A., & Komiyama, S., (2019). Comparison of active and passive methods for the infrared scanning near-field microscopy. *Applied Physics Letters*. 114(15), 153101 <https://doi.org/10.1063/1.5088056>
- Yen, S. H., Tang, P. C., Lin, Y. C., & Lin, C. Y. (2019). Development of a Virtual Force Sensor for a Low-Cost Collaborative Robot and Applications to Safety Control. *Sensors*, 19, 2603. <https://doi.org/10.3390/s19112603>



Vitković, N., Korunović N., Arandelović, J., Miltenović, A., & Perić, M. (2022).  
Remodeling of complex surface patches by using the method of characteristic  
features – the ski shoe heel lip example, Innovative Mechanical Engineering,  
1(2), 96-105

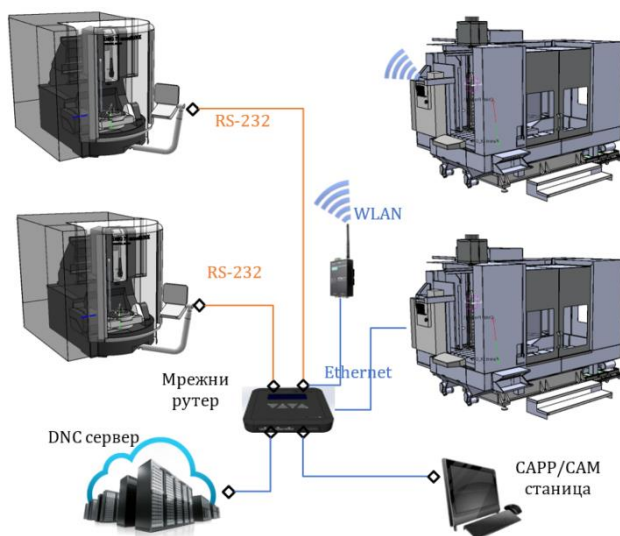
# 7 DNS И КОМУНИКАЦИОНИ ПРОТОКОЛИ

---

- 7.1 Разлози за примену DNS система
- 7.2 Комуникација DNS систему
  - 7.2.1 Методе за учитавање извршног програма
- 7.3 DNS концепти
  - 7.3.1 Мрежна технологија за DNS системе
- 7.4 Модерни DNS - платформа за „дигиталну производњу”  
Литература



Скраћеница DNC (*direct numerical control*) је првобитно означавала „директну нумеричку контролу”. Такође, може се наићи на тумачење скраћенице DNC у којем се наводи да она означава дистрибуирану и/или дистрибутивну нумеричку контролу (*distributed numerical control*). Чини се да је најпрецизније тумачење ове одреднице оно које истиче да је DNC непосредно управљање радом више НУ машина применом рачунарских програмских апликација инсталираним на рачунарима, који су са управљачким јединицама и контролерима НУ машина повезани путем рачунарске мреже (Слика 7-1).



**Слика 7-1** Схема директне нумеричке контроле и могући комуникациони канали.

Према стандарду VDI 3424<sup>1</sup>, суштинска одлика DNC-а је „управљање и правовремена дистрибуција контролних информација на више НУ машина, у којима рачунар може преузети одговорност за функције нумеричке контроле”. За разлику од времена када је настао овај опис (1972), савремене НУ машине су опремљене знатно снажнијим рачунарима него онда, тако да су функције управљања НУ машином пресељене у потпуности на управљачке јединице, рачунаре за контролу рада НУ машина. Поред НУ машина, DNC се односи на управљање и друге врсте опреме коју налазимо у савременим производним окружењима, попут уређаја за умеравање алата, НУ мерних машина, робота и роботских манипулатора и

<sup>1</sup> Немачки стандард у вези са директном контролом нумерички управљаних обрадних машина путем рачунара који датира из 1972. године.

самостално управљаних возила. Што се тиче рачунарских мрежа, у савременим производним окружењима тежи се бежичном типу преноса података и редукцији жичаног и оптичког типа преноса података, осим тамо где је то из посебних разлога неопходно. Најчешће су то безбедоносни разлози и с циљем да се избегну сметње у преносу података услед електромагнетних емисионих загађења амбијента. Савремена рачунарска опрема и софтвер, који се користе за формирање DNC амбијента, омогућавају свим производним средствима и опреми у савременом производном окружењу да међусобно двосмерно комуницирају кроз локалну мрежу (тзв. LAN). Са директним преносом података „од рачунара до машине” (*computer to machine – C2M*) и „од машине до машине” (*machine to machine – M2M*) губи се потреба за „носачима података”, односно средствима за складиштење података који су се раније користили, попут бушене и магнетне траке, дискета, компакт дискова и флеш меморија (тзв. USB флеш меморије су и даље веома присутне као средства складиштења и преноса података у многим погонима). Такође, губи се потреба за уређајима потребним за читање и писање података са и на ове *носаче*.

Иако се информационе технологије у великој мери мењају свакодневно, основне функције DNC система остале су исте. DNC систем мора да обави два основна задатка:

1. да осигура безбедан и благовремен пренос података ка НУ машинама, али и у обрнутом смеру, са НУ машина ка удаљеним рачунарима с којима се контролише одвијање производног процеса и
2. да управља складиштењем, слањем и спровођењем већег броја извршних програма за НУ машине.

Обављањем ових функција, DNC систем спречава могућа оштећења опреме и делова, затим обезбеђује правилну организацију и складиштење великих количина података, чиме се значајно доприноси повећању продуктивности и квалитета процеса производње. DNC системи могу бити подешени тако да пружају основни и проширени скуп функција, као што су, на пример, управљање подацима о алатима, машином и радним комадима у високо аутоматизованим производним системима.

## **7.1 РАЗЛОЗИ ЗА ПРИМЕНУ DNC СИСТЕМА**

Сврсисходност увођења DNC система зависи од бројних услова и разлога. Неки од њих су побројани ниже у тексту:

1. Постојање честих промена извршних програма. Што је величина серије мања, то је већи проблем да тачан извршни програм увек буде доступан на правој машини у право време. Применом DNC, извршни програм је доступан на НУ машина

- одмах након позива. У тзв. проширеним системима, сви додатни подаци, нпр. вредности компензације алата и информације оператера су такође доступни.
2. Број НУ машина. Примена DNC може бити исплатива чак и у погонима са само две или три НУ машине, под условом да је неопходно свакодневно вршити промене извршних програма. Сврхисходност примене DNC-а постаје све очигледнија са сваком додатном машином.
  3. Велики број извршних програма. Администрирање неколико хиљада извршних програма са припадајућим модификацијама, ажурирањима и променама тешко се могу решити без употребе рачунара. DNC систем може значајно олакшати овај посао и минимизирати ризик од људске грешке.
  4. Постојање извршних програма великих дужина. У случају да погон има већи број старијих НУ машина, може се јавити проблем да се велики извршни програми (велики број линија кода) не може учитати истовремено јер су у погледу меморије већи од капацитета којима располажу те старије НУ машине. DNC системом се то може превазићи тако што се може непосредно „храни“ УЈ НУ машине подацима кроз мрежу.
  5. Стварање великог броја нових извршних програма. Ако је производња у погону таква да често и много нових извршних програма треба спроводити или постоје честе и многобројне измене програма, директан трансфер извршног програма из *CAPP/CAM* апликације са удаљеног рачунара на УЈ НУ машине доноси велику предност. Такође, у погонима у којима се често врши програмирање НУМА „у погону“, односно непосредно на *CAM* апликацији на УЈ, веома је важно имати могућност да се тако настали извршни програми ефикасно и трајно бележе и складиште на неком централном месту. DNC систем је управо намењен за ове ситуације.
  6. Високе брзине преноса података. У погонима у којима има НУ машина које се често користе за машинску обраду великим брзинама резања (*high speed machining*) или за контурна сечења ласерским зраком обично постоји захтев за изузетно великим протоком података. DNC систем са високо-пропусном мрежном инфраструктуром (нпр. оптичка мрежа) омогућава да се остваре захтевани велики проток података и предупреди ситуација у којој НУ машина заустави спровођење операције обраде зато што извршни програм буде учитаван у УЈ НУ машине са прекида у реалном времену.

7. Постојање потребе за управљање подацима о алатима помоћу рачунара. Интегрисано управљање алатима и подацима о алатима може обезбедити огромне уштеде технолошком систему. Праћењем постојаности алата у реалном времену могуће је остварити веће учинке у погледу продуктивности. Такође, оптимизацијом коришћења алата, могуће је избећи непотребно постављање и скидање алата са НУ машине и тиме остварити велике уштеде припремно-завршног времена. Пренос свих података о алату скраћује потребно време за допуну тих података на УЈ НУ машине, а уједно смањује ризик погрешног уноса података, јер је мање тих парцијалних уноса са више места.
8. Потреба за увођењем флексибилних технолошких система (ФТС). Код тзв. флексибилних технолошких система карактеристично је да постоји могућност да се на једној истој машини или скупу машина у тзв. технолошкој ћелији обрађују или израђују више различитих израдака сукцесивно, један за другим, са одликама серијске и велико-серијске производње, односно са минималним специфичним припремно-завршним временом. Дакле, то су системи опремљеним НУ машинама и роботима који имају велики капацитет да брзо обаве промене обрадног алата, стезања и извршења различитих извршних програма. У таквом амбијенту, неопходно је да централни рачунар DNC система (или више њих) поред основних функције DNC-а обавља и низ других припремно-завршних операција попут мерења алата и обратка, праћења спровођења извршног програма, снимања стања алата и радне зоне, складиштења и управљања деловима и алатима, прибором и др. У случају ФТС-а, које одликују обрадне ћелије у којима се одвијају комплементарне операције обраде<sup>2</sup>, потребно је свакој машини у обрадној ћелији обезбедити одређени број одговарајућих делова извршног програма, и потом, координисати њихово спровођење у зависности од расположивости појединих машина у ћелији. Такође, рачунари DNC система у ФТС-у праве резервне копије података о оперативном статусу сваке машине у реалном времену, као што је стање алата у магацину, тачка прекида операције обраде, вредности компензације алата и др. За случај

---

<sup>2</sup> На пример, ради се о групи машина код којих се одвија скуп операција обраде над истим или више различитих делова. Сваки од делова пролази кроз стругарску обраду, затим се део обраде треба обавити на глодалици, потом следи контурно сечење и коначно брушење.

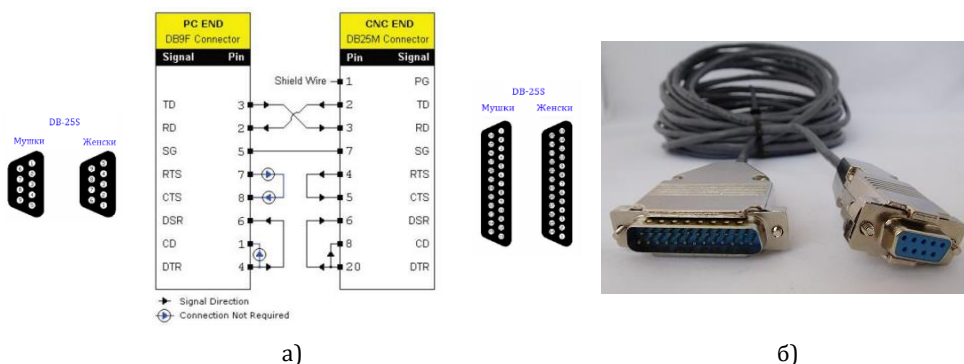


губитка података у меморији УЈ НУ машине услед непланираног прекида, ова функционалност обезбеђује значајну уштеду времена за поновно покретање процеса обраде.

Имајући у виду свеприсутност примене информационих технологија и рачунарских система за развој и производњу производа (*CAD/CAE/CAPP/CAM* система), затим система за управљање материјалним и производним ресурсима технолошких система (машинама, алатима, прибором за стезања и подешавање) јасно је да потребно обрађивати све веће количине података и истовремено их чинити доступним члановима технолошког система за краће време Управо из ове перспективе, јасно је да DNC систем представља основну компоненту рачунарски интегрисане производње (computer integrated manufacturing – CIM).

## 7.2 Комуникација DNC СИСТЕМУ

Серијски интерфејс RS-232 је стандардни комуникациони протокол за повезивање рачунара и њихових периферних уређаја ради омогућавања серијске размене података. Серијски интерфејс RS232 (Слика 7-2) је уобичајени и нашироко коришћени комуникациони протокол који омогућава двосмерну комуникацију, односно може се користити или за слање података са машине на рачунар или за слање података са рачунара на НУ машину. С обзиром на то да је серијски пренос података веома подложен сметњама (RS-232 гарантује поуздан пренос података до 15 метара) и има само рудиментарну проверу података, пренос података мора бити обезбеђен помоћу комуникационих протокола. Старије управљачке јединице произвођача НУ машина преносе податке путем блокова података, при чему сваки блок добија контролну суму података коју УЈ НУ машине поново утврђује (срачунава), а резултат се шаље назад у рачунар и потврђује. Ако се утврди да постоји одступање у контролној суми, УЈ НУ машине аутоматски захтева да се пакет поново пошаље. Ове протоколе, FE1, FE2, LSV-2, и др., због оваквог начина преноса података одликују ниже брзине преноса, али ипак обезбеђују пренос без грешака. Поред тога, омогућавају читање извршних програма са великим бројем линија који су већи од меморијског капацитета НУ машине.



**Слика 7-2** Приказ шеме DB 9S и DB 25S конектора (а) који омогућавају серијску комуникацију RS232 између рачунара и НУ машине и кабла са та два конектора (б).<sup>3</sup>

Код НУ машина које поред серијског RS232 интерфејса користе и *Ethernet* комуникацију, односно код НУ машина које се могу повезати у савремену рачунарску мрежу, може се наићи на читав спектар оперативних система (Unix, Linux, MS DOS и MS Windows) и одговарајућих протокола за пренос података. Већина јапанских произвођача НУ машина фаворизује FTP протокол за пренос података, док европски произвођачи чешће користе протоколе као што су Netbios, Netbeui и NFS.

### 7.2.1 МЕТОДЕ ЗА УЧИТАВАЊЕ ИЗВРШНОГ ПРОГРАМА

Данас се користе две различите методе за учитавање програма у програмску меморију УЈ НУ машина са серијским интерфејсом:

1. „Метод преноса” - рачунар или тзв. терминал који је додељен машини шаље извршне програме. При томе, НУ машина мора бити претходно подешена на „*Read in*” режим рада (режим учитавања), након чега се програм шаље УЈ НУ машине са удаљеног рачунара у DNC систему.
2. „Метода позивања” - овај метод се користи у системима без терминала. Овде позивни програм, такође познат као *dumty* програм или програм за покретање комуникације (*runner*), врши формирање захтева за извршним програмом који треба учитати. Удаљени рачунар у DNC систему добија захтев и припреми тражени извршни програм за слање УЈ НУ машине. Ипак, оператор за НУ машином мора да изврши подешавање режима рада УЈ за учитавање (*read in*).

<sup>3</sup> [https://www.fadalnc.com/media/pdf/FANUC\\_RS232\\_Communication.pdf](https://www.fadalnc.com/media/pdf/FANUC_RS232_Communication.pdf)

Код НУ машина чије УЈ комуницирају преко *Ethernet*-а (то су рачунари попут уобичајених персоналних рачунара) могу приступити серверу директно преко мреже без преласка на посебан режима рада (нпр. учитавање) веома налик ономе што радимо са уобичајеним коришћењем рачунара преко мреже. Такође, на исти начин се и датотеке у УЈ пребацују на удаљене рачунаре у DNC систему.

### 7.3 DNC КОНЦЕПТИ

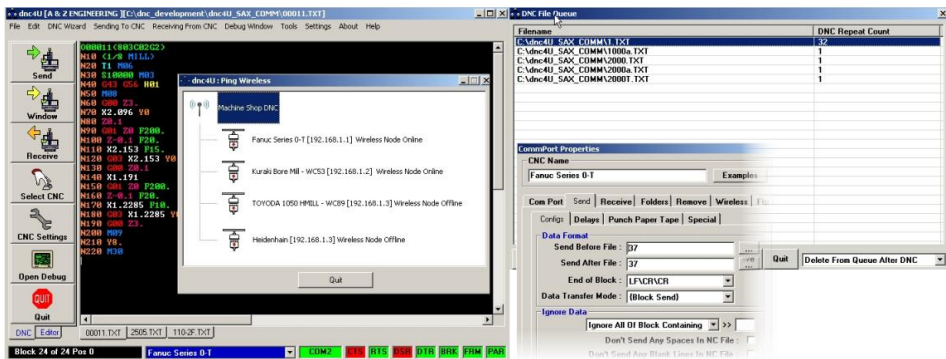
Сви постојећи DNC системи повезују УЈ НУ машина са рачунарима путем стандардних мрежних каблова или серијских каблова. Постоје три различита концепта. Први су DNC системи који користе искључиво серијску комуникацију и серијске каблове. Ови системи се првенствено сусрећу у малим инсталацијама са само неколико НУ машина. Један „централни” рачунар се користи за комуникацију са једном, две или више НУ машина. На њему се трајно складиште извршни програми и он је једини уређај преко којег се размењују подаци са НУ машинама. Овај рачунар је често опремљен са вишеструком серијском интерфејс картицом и повезује се са НУ машинама преко RS-232. Ако се користе бакарни каблови, брзина преноса је обично ограничена како би се повећала поузданост преноса, чиме се повећава време застоја машина. Због тога се уместо њих користе оптички каблови који су отпорнији на сметње. Овај тип DNC система је погодан за мала предузећа са само неколико машина, где се рачунар налази близу машина, идеално на мање од 15 m удаљености. У таквим системима се могу наћи и метод преноса и метод позивања.

Други концепт на који налазимо у пракси су *DNC системи са терминалима*. Ови DNC системи су доминирали током 90-их година прошлог века. Њихова основна одлика је да се користе *терминали*<sup>4</sup> (хардвер/софтвер) за размену података између сервера (централног рачунара DNC система) и НУ машина у погону. Оператер за машином може да види све податке и датотеке у вези са обрадом и може да користи *терминал* за учитавање извршног програма. Ови DNC системи имају способност аквизиције података са НУ машине (*manufacturing data acquisition - MDA/ production data acquisition - PDA*). То су подаци у вези са текућим операцијама обраде које се одвијају на НУ машинама. Такође, у овим DNC

---

<sup>4</sup> Терминал је одредница која се овом контексту означава заправо рачунар на крају мреже. Ради се заправо о рачунарском уређају при самим НУ машинама које се налазе на крајевима DNC мреже. Такође, у истом контексту, одредница терминал може означавати софтвер који се користи за непосредну контролу комуникације како ка управљачкој јединици НУ машине и контролерима тако и према рачунарима у DNC мрежи.

системима омогућен је даљински приступ релевантним сигнаlima из програмабилног логичког контролера (PLC), и, у случају појаве неког отказа или неке упозоравајуће информације са сензора у обрадној зони, прослеђују те податке централном рачунару DNC система. Комуникациони водови код велике већине DNC система ове врсте су засновани на употреби стандардних рачунарских мрежа. DNC системи са терминалима пружају максималну погодност, али захтевају темељну обуку оператера.



Слика 7-3 DNC Терминал за комуникацију са DNC сервера према НУ машинама кроз RS 232 комуникацијски протокол.<sup>5</sup>

Мрежни DNC системи користе стандардне мрежне адаптере за пренос података, тј. НУ машине су интегрисане у локалну рачунарску мрежу погона са Ethernet протоколом и са серијским интерфејсом мрежног адаптера, који се такође назива сервер уређаја, *COM* сервер или терминал сервер. Оваква инфраструктура омогућава софтверу У НУ машине да тражи и учитава извршне програме са удаљених рачунара DNC система без посредничких терминала. Код ових DNC система типичан проблем вулнерабилности преноса података на велике удаљености је превазиђен стандардима технологије рачунарских мрежа. Пошто су релативно јефтине, ови системи су подједнако погодни и за мала и за велика предузећа. Бежични LAN (WLAN) се такође често користи данас уместо конвенционалног Ethernet кабла. Савремени оперативни системи, Windows и Linux, дозвољавају пренос на или са више машина истовремено.

### 7.3.1 МРЕЖНА ТЕХНОЛОГИЈА ЗА DNC СИСТЕМЕ

Протоколи у стандардним Ethernet мрежама обезбеђују пренос великих количина података на велике удаљености без грешака. Протокол

<sup>5</sup> <https://www.dnc4u.com>

за контролу преноса или Интернет протокол (TCP/IP<sup>6</sup>) на коме су мреже данас засноване, обезбеђује пренос чак и у индустријским окружењима где постоје све врсте сметњи, гарантујући апсолутно комуникацију без грешака. Данашњи DNC системи користе скоро искључиво рачунаре засноване на Windows-у и стандардне локалне рачунарске мреже (LAN). За повезивање НУ машина које имају само серијски комуникациони интерфејс, као медијски претварачи користе се мрежни адаптери, односно COM сервери и сервери уређаја. Они трансформишу податке из серијског у Ethernet и обрнуто. Посебно прилагођени мрежни адаптери садрже DNC функције и раде као засебни рачунари са сопственим програмом за пренос података и имплементираним функцијама филтера.

Други мрежни стандард је WLAN. Бежичне мреже су такође *ethernet* мреже које проверавају саобраћај података помоћу TCP/IP. Они раде у високофреквентном опсегу 1GHz + и преносе податке без директне кабловске везе. Коришћење бежичне мреже је посебно повољно у погледу трошкова. Уместо стварања жичане инфраструктуре у производном подручју, у многим случајевима је потребна само приступна тачка. Постављени на одређеној удаљености изнад пода, пријемници могу да раде на дometима до 100 m. Са друге стране, WLAN доноси ризике у погледу лакшег нежељеног упада у мрежу, чиме се оставља већа могућност за индустријску шпијунажу и саботажу. Такође, у областима са великим преносом податка, различите WLAN мреже могу да се преклапају и ометају једна другу.

НУ машине са Ethernet интерфејсом је могуће једноставно повезати са удаљеним рачунарима, те је приступ и читавање извршних програма са њих такође лако за имплементацију. Ипак, и даље је обавезно користити рачунарске програмске апликације које формирају DNC окружење (*Cloud for DNC*) из неколико разлога. Најпре, неопходно је имати софтверски систем за организацију и контролу приступа и привилегија над директоријумима на удаљеним рачунарима. Затим, на тај начин се сви рачунари у технолошком систему штите од потенцијалних мрежних напада и софтверских вируса. Коначно, DNC *Cloud* сервиси прате и бележе све преносе података и одлике приступања подацима чиме се ствара могућност за анализу (ИТ форензику) и опоравак података. Детаљан дневник (*Log*) са списком свих трансакција је од суштинског значаја, посебно када је потребна следљивост, као у ISO9001 и у медицинској технологији регулисаном EN ISO 13485:2003. На овај начин је увек могуће утврдити који део је произведен на којој машини помоћу које верзије програма.

---

<sup>6</sup> Transmission Control Protocol/Internet Protocol

## 7.4 Модерни DNC - ПЛАТФОРМА ЗА „ДИГИТАЛНУ ПРОИЗВОДЊУ”

Модерно дизајнирани DNC системи увелико превазилазе сужени скуп захтева за контролу обављања извршних програма са удаљених рачунара на НУ машине у погону. Савремени DNC системи су се интегрисали у систем софтверских решења који се назива *Manufacturing Execution Systems* - MES. Поред слања извршних програма за НУ машине, савремени DNC системи имају низ додатних функција, посебно у погледу управљања подацима о производним активностима које се непосредно спроводе:

- управља извршним програмима организованим по НУ машинама или групама НУ машина;
- управља производним информацијама, односно документима свих врста, који се односе на извршни програм за НУ машину;
- управља извршним програмима према логичком идентификатору у складу са конвенцијама система за планирања производње и система за планирање ресурса предузећа;
- означава преносе података који су у току;
- омогућава и координише рад више корисника над истим датотекама (извршним програмима):
  - а. аутоматски мења статус приступа програмима, односно онемогућава и омогућава могућност њихове измене у зависности да ли су у употреби, или у преносу или се уређују;
- омогућава интеграцију више различитих *CAPP/CAM* система;
- Приказује промене у модификованом програму и врши поређење извршних програма;
- обезбеђује аутоматизовани размену података са *CAPP/CAM* системима, затим са системима за управљање производним ресурсима (машинама, обрадним и стезним алатима и прибором);
- води дневник са списком свих трансфера које се обављају са УЈ НУ машине, учитавање и трајно бележење програма на и са НУ машина, итд.;
- аутоматски архивира застареле верзије програма и
- срачунава и приказује статистику преноса датотека.

На крају излагања о DNC и протоколима комуникације у савременим производим окружењима треба посебно обратити пажњу на стандарде који се управо развијају и имплементирају у окружењима индустрије 4.0. Ради се низу организација које интензивно раде на новим стандардима комуникације, који треба да омогуће све предности примене ИТ у индустрији и у којима ће преовлађавати *M2M* комуникација, где ће

сва производна средства постати део корпуса *индустријских интернет ствари* IIoT: Umati<sup>7</sup>, MTConnect<sup>8</sup>, NC-Link<sup>9</sup> и OPC UA<sup>10</sup>, mqtt<sup>11</sup>, B2MML<sup>12</sup>

“MTConnect Standard је стандард за размену података и информација који се заснива на речнику података и термина који описују информације повезане са производним операцијама. Стандард такође дефинише низ семантичких модела података који пружају јасну и недвосмислену представу о томе како се те информације односе на производну операцију. MTConnect Standard је дизајниран да побољша могућности прикупљања података из сензора постављених у производној опреми, како би се омогућила аутоматизација доношења одлука на основу великог броја података прикупљених у производним операцијама. Коначно, очекује се да ће то омогућити формирање тзв. *plug-and-play* производних окружења или технолошких система код којих се одговарајуће рачунарске апликације за подршку производњи и производна опрема аутономно конфигуришу и комуницирају. Тиме би се смањили трошкови формирања и интеграције технолошких система”. MTConnect Standard је отворен стандард без накнаде – што значи да је доступан било коме за преузимање, имплементирање и коришћење у софтверским системима без икаквих трошкова за имплементатора. Детаље овог стандарда можете пронаћи на:

<https://docs.mtconnect.org/MTConnect Part 1-0-Overview and Fundamentals 1-8-0.pdf>

---

<sup>7</sup> <https://umati.org>

<sup>8</sup> <https://www.mtconnect.org>

<sup>9</sup> <http://www.nc-link.org.cn>

<sup>10</sup> <https://opcfoundation.org>

<sup>11</sup> <https://mqtt.org>

<sup>12</sup> [www.mtcup.org/en/B2MMLm](http://www.mtcup.org/en/B2MMLm)



## Литература

- Chang, T. C., Wysk, R. A., & Wang, H. P. (2006) Computer Aided Manufacturing (3rd ed.), Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-142919-1
- Fitzpatrick, M. (2005). Machining and CNC Technology (1st ed.). The McGraw-Hill Companies ISBN 0-07-825090-0
- Kief, H. B., Roschiwal, H. A. & Schwarz K. (2022) The CNC Handbook, Digital Manufacturing and Automation from CNC to Industry 4.0, Industrial Press inc. ISBN (ePUB) 978-0-8311-9498-7
- Smid, P. (2007). CNC Programming Handbook: Comprehensive guide to practical CNC programming (3rd ed.). Industrial Press Inc. ISBN 0-8311-3158-6
- Stenerson, J. & Curran, K. (2007). Computer Numerical Control – Operation and Programming (3rd ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-111547-2
- Valentino, J. V., Goldenberg, J. (2008). Introduction to Computer Numerical Control (4th ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN-10: 0-13-243690-6
- Wang, X., & Bi, Z. (2020). Computer Aided Design and Manufacturing (1st ed.), John Wiley & Sons Ltd, ISBN 9781119534211
- Xue, J. (2018). Integration of *CAD/CAPP/CAM* (1st ed.), Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston; Science Press, ISBN 978-3-11-057308-4

# 8 *CAPP/CAM* СИСТЕМИ У ИНДУСТРИЈИ 4.0 +

---

8.1 Уградња вештачке интелигенције у *CAM*

8.2 Проширена стварност у *CAM*

8.2.1 Кратка историја *AR*-а

8.2.2 Компоненте *AR*-а

8.2.3 Примена *AR*-а

Литература



Фраза Индустрија 4.0 (изворно, нем. *Industrie 4.0.*) први пут се појавила на сајму у Хановеру 2011. године. Три представника немачког индустријског комплекса<sup>1</sup> су је представили јавности. Желећи да прикажу своју анализу разлога због којих је Немачка успела да у време глобализације, коју карактерише сељење производних погона из индустријски развијених земаља у земље са нижом вредношћу рада, најпре задржи, а потом и унапреди своје производне капацитете и, истовремено, задржи и осигура преимућство у односу на земље попут Кине, и, при томе, увећа специфичну додату вредност по ангажованом човек-сату, ова тројица говорника су изнели тезу да је суштинска предност „немачке привредне машине” у безрезервној спремности производних компанија у Немачкој да развијају и уводе нове технологије. Заправо, главно тврђење се односило на чињеницу да је том позитивном резултату, у највећој мери, допринела брза интензивна и свеобухватна имплементација достигнућа на пољу информационих технологија у домену производње. Полазећи од тога, најављена је и препоручена *иницијатива* (пре свега, намењена свим земљама ЕУ и њеним стратешким партнерима) која би могла осигурати високо развијеним земљама западне Европе најпре опстанак, а затим и просперитет у трци за технолошком изврсношћу која, уграђена у производу, на крају омогућава велику специфичну додату вредност људског рада и зараду. Управо та *иницијатива* је насловљена као тзв. четврта индустријска револуција или, скраћено колоквијалном одредницом-*индустријом 4.0*, усвојеном у ширем друштвеном и медијском простору. Она се најтачније може описати одредницом - *производња свеобухватно и подробно подржана информационим технологијама*. Овде се говори о производњи подржаној рачунаром или *Computer Aided Manufacturing (Computer Aided Production)*. Придев „потпомогнута, или „подржана” (-*aided*) је постао исувише „слаб” да опише степен обухвата укључености рачунара и рачунарских програмских апликација, који је у међувремену досегнут. Такође, поред свеобухватности, информационе технологије се користе у свим детаљима процеса стварања производа и технолошких поступака, као и у њиховом спровођењу, чиме се додатно аргументује тврдња о слабости атрибута „-*aided*”. Данас се већ увелико користи нова одредница - *Digital Manufacturing*. Управо она представља ту „ширину” и „дубину” укључености ИТ у производњи. Ипак, без обзира на време свог настанка, савремене *CAPP/CAM* апликације (и алати који долазе са њима) представљају део корпуса ИТ који се налази у самом језгру *дигиталне*

---

<sup>1</sup> Henning Kagermann (као представник пословне заједнице), Wolf-Dieter Lukas (у својству представника високих политичких структура), и Wolfgang Wahlster (у својству представника истраживачко-академске заједнице)

*производње*. Из тог разлога може се истаћи важност и релевантност знања и вештина из области примене CAPP/CAM система у савременом и будућем производном окружењу.

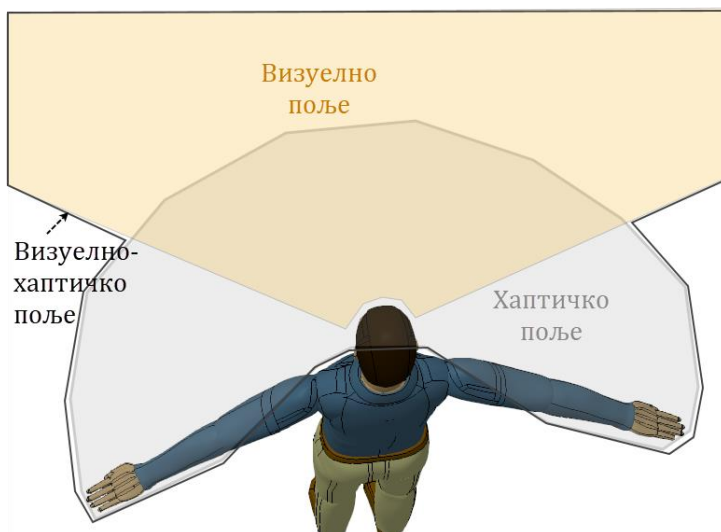
Имајући у виду текуће трендове развоја ИТ, може се наслутити где ће се то највише одразити на CAD/CAE и CAPP/CAM системе. Пре свега, то је интензивно укључивање метода вештачке интелигенције (ВИ) у ове рачунарске апликације с циљем даљег унапређења аутоматизације пројектовања производа и поступака израде. Истовремено, са повишеним степеном аутоматизације треба очекивати да ће методе ВИ значајно умањити појаву људских грешака и превида у процесу пројектовања (моделирања) и, самим тим, унапредити квалитет производа. Када говоримо о спровођењу моделираних (пројектованих) поступака обраде/израде делова и производа, постојеће методе ВИ већ сада значајно утичу на доношење одлука у процесу производње у реалном времену, с обзиром на неупоредиво већи капацитет обраде и анализе великих количина података које пристижу са бројних сензора у производњи, у односу на човека. Амбијент тзв. *сајбер-физичког* технолошког система обилује *индустријским интернет стварима* које стварају огромне количине података из којих је потребно препознавати одлике актуелног контекста и статуса технолошког система и, сходно тим одликама, предузимати оптималне одлуке и мере ради остваривања максималних вредности постављених кључних показатеља учинка технолошког система. Препознавање одлика статуса технолошког система у реалном времену и доношење оптималних одлука и мера јесу, заправо, задаци за методе вештачке интелигенције у савременим и будућим CAM системима.

Следећа важна новина, која се већ увелико ствара за све *Computer Aided* рачунарске апликације (CAx), па и за CAPP/CAM системе, јесте унапређење нивоа сарадње и упоредног моделирања производа и технолошких поступака. Са развојем комуникационе инфраструктуре и велике пропусне моћи рачунарских мрежа, „рачунарство у облаку” или *Cloud computing* постаје незаобилазни сервис који непосредно мења начин рада савремених инжењерских бироа и технолошких система. Све *Computer Aided* рачунарске апликације прелазе на концепт *софтвера као сервиса* (*Software-as-a-Service SaaS*) који се може покретати у Интернет претраживачу, чиме је доступност ових CAx система постала још већа. Суштина овог приступа је у томе да се све рачунарске операције неког CAM-SaaS-a, а посебно оне које су рачунарски захтевне, попут генерисања сложене путање алата и анимације кретање алата и обратка, обављају даљински на рачунарским апликацијама које „раде на *Cloud-y*” (у посебној мрежи рачунара велике процесорске снаге). Дакле, web-апликација коју користи инжењер представља само интерфејс CAPP/CAM

апликације која се налази инсталирана „на *Cloud-y*” (види [www.oneshape.com](http://www.oneshape.com)). Овај приступ омогућава инжењерским бироима и технолошким системима да велики део ангажовања на одржавању ИТ система пребаце на „добављача” *SaaS*-а. Тиме, употреба ИТ система у овом домену делатности, постаје јефтинија за корисника, на једној страни, а, на другој, доноси већу зараду пружаоцима *SaaS*-а. На тај начин је омогућена боља заштита интелектуалне својине стваралаца софтвера који се нуди као сервис. Међутим, овакав сценарио не пружа гаранцију корисницима интелектуалне својине јер зависи од сајбер безбедности, која, нажалост, може бити компромитована на различите начине. Још једна предност, која се обично представља купцима (корисницима) *SaaS*-а, јесте унапређење сарадње у односу на конвенционалне приступе тзв. конкурентног или упоредног пројектовања. Ова предност (односно унапређење спрам постојећих решења упоредног пројектовања) је, такође, дискутабилна и тек ће време и решења у реалној пракси показати да ли су званична очекивања оправдана. У контексту све присутнијег концепта *SaaS*, савремене и будуће *CAD/CAE* и *CAPP/CAM* рачунарске програмске апликације се све више нуде у виду максимално прилагођених решења потребама корисника. Заправо, корисник *CAx* софтвера је у прилици да конфигурише скуп алата који ће користити у *SaaS*-у у односу на функције које су му потребне за одређени домен послова. Иако овај приступ конфигурисања софтвера одавно постоји, сада ће конфигурисање функционалности *CAx* софтвера бити могуће изводити још детаљније. Такође, избором *Add-in* -ова или *екстензија* биће омогућено интегрисање различитих софтвера (на пример, у *Oneshape* ће бити могуће користити неке *Add-in*-ове из *Gibbs CAM* -а за моделирање једне врсте технолошких операција, а из *Master CAM* -а *Add-in*-ове за другу врсту). Овакав приступ у конфигурацији софтвера нуди већу приступачност (софтвер ће бити јефтинији, јер ће корисник моћи да избаци десетине функција из уобичајене конфигурације, које му, вероватно, никада неће бити потребне) и истовремено већу флексибилност у погледу интероперабилности са више *CAx* софтвера.

Технологије виртуелне стварности (*virtual reality* - *VR*), проширене стварности (*augmented reality* - *AR*) и помешане стварности (*mixed reality* - *MR*), према мишљењу већине промотера сајбер-физичких технолошких система, представљају незаобилазну технологију у амбијенту *индустрије 4.0*. Ове технологије унапређују ниво визуелизације која је све потребнија човеку-учеснику у сајбер-физичким технолошким системима. Главна предност коју ове технологије, а посебно *проширена* и *помешана стварност*, пружају корисницима у производном окружењу је фасцинантна

виртуелизација дигиталног садржаја у визуелно и хаптичко поље човека (ВХП) (Слика 8-1).



**Слика 8-1** Приказ визуелног и хаптичког поља човека.

Мешањем виртуелизованог дигиталног садржаја са објектима из стварног света, ствара се нека врста проширене или помешане стварности, која пружа много детаљније визуелно, звучно и тактилно искуство оператеру који носи *AR/MR* опрему. Оваква функционалност је идеална за низ апликација у производном окружењу – од визуелизације упутстава за обуку, преко визуелизације упутстава за рад у производњи до ефективне визуелизације измерених величина прикупљених са сензора опреме и машина. На самом почетку овог уџбеника је наведено да је једна од две највеће употребне вредности *CAPP/CAM* рачунарских апликација управо визуелизација моделираних поступака обраде, операција и захвата (посебно када се ради о случајевима сложених обрадних радњи које је, иначе, тешко визуелно представити у мислима). Виртуелизација модела производног склопа и читавог амбијента производне ћелије у реалан простор пружа сасвим нови квалитет процесу моделирања технолошких операција и захвата. Анимације кретања извршних органа машине, алата и обратка, као и симулација самог процеса обраде материјала (резање, деформација, наношење), уз помоћ *AR/MR* опреме пружају много ефектнији приказ.



## 8.1 УГРАДЊА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У САМ

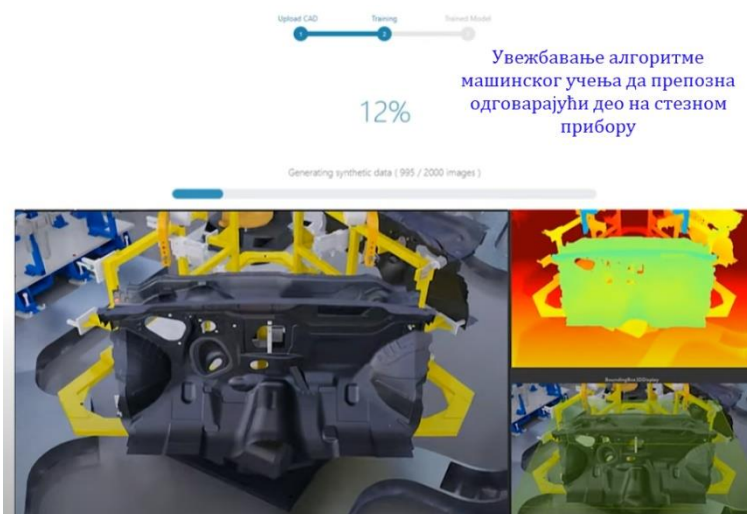
Методе вештачке интелигенције су све присутније у свакодневним активностима људи, а посебно у оним делатностима у којима је коришћење рачунара интензивно. Као што је 90-тих година прошлог века постало очигледно да ће рачунари и рачунарске програмске апликације за кратко време постати неодвојиви део наших живота и сваке активности, тако смо, управо данас, сведоци времена у коме методе вештачке интелигенције (у овом тренутку, пре свега, методе тзв. машинског и дубоког учења) постају незаобилазне у анализи и семантичкој категоризацији сложених контекста који се одликују великим бројем променљивих параметара, затим у доношењу одлука и, коначно, у контроли спровођења активности на бази тих одлука.

У домену моделирања операција машинске обраде (конвенционалне и неконвенционалне) и операција израде делова адитивним технологијама, као и у контексту моделирања операција мерења и операција монтаже, методе вештачке интелигенције могу и већ налазе значајну примену на следећим местима:

1. Једно од најизазовнијих места у примени метода вештачке интелигенције, када се говори о домену моделирања операција обраде помоћу рачунара, јесте аутоматизација избора начина и редоследа стезања и оријентације припремка. Имплицитно, овај изазов крије у себи још један проблем који методе ВИ треба да реше, а то је доношење одлуке о врсти и редоследу обрада које треба обавити да би се део израдио. За сада, већина комерцијалних *CAPP/CAM* апликација, односно метода ВИ које су уграђене у софтвер, није у стању да обави овај задатак успешно без помоћи инжењера. Задатак који стоји пред методама ВИ, које се уграђују у *CAPP/CAM* апликације, управо се односи на доношење одлуке о начину и редоследу стезања, имајући у виду производна ограничења (расположиве стезне алате и прибор, врсте и одлике НУ машина и резних алата) и операције обраде које треба остварити. Предност која би проистекла из успешне аутоматизације овог дела поступка моделирања технолошких операција је велика и огледа се у значајном смањењу припремно-завршног времена, које, иначе, у појединачној и малосеријској производњи „узима” велики део укупног времена израде дела.
2. Када се операције обраде већ одреде (определи се машина, њена оријентација и оријентација припремка), без обзира да ли то

уради ВИ или инжењер, методе ВИ могу даље послужити за препознавање и категоризацију геометријско-технолошких форми на изратку које ће послужити да се на основу те категоризације одреде захвати и алати (Слика 8-3). Методе ВИ се могу упослити за избор потребних операција и захвата спрам категоризације геометријских, функционалних и технолошких одлика изратка. Такве апликације ВИ су већ сада могуће (Слика 8-4).

3. У домену монтаже, примена метода ВИ се може наћи у препознавању тренутног припрема (на пример, дела аутомобилске каросерије) између четири различите варијанте геометрије у хелији за монтажу и, према обављеној категоризацији, врши се одговарајуће размештање стезног прибора, као и учитавање путање роботске руке за наношење лепка за тај део. (Слика 8-2)



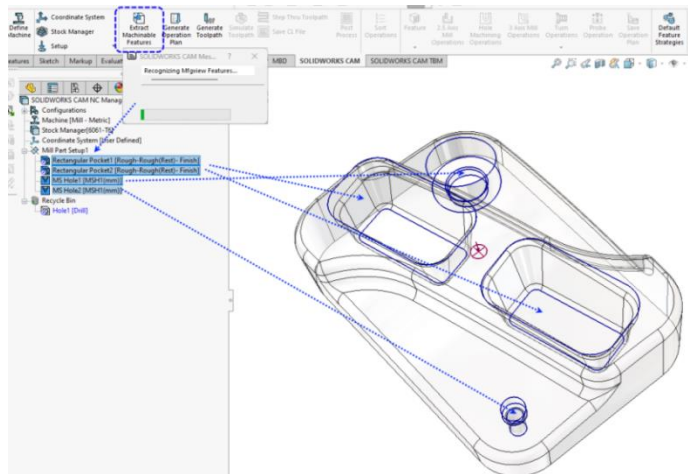
**Слика 8-2** Приказ увежбавања ВИ која руководи роботом да препозна припремак на стезном прибору и да према њему обави операције спајања (заваривањем).

(преузето са видео записа NX Siemens и Nvidia индустријски метаверзум.  
[https://www.youtube.com/watch?v=w\\_yX\\_lh1fgE](https://www.youtube.com/watch?v=w_yX_lh1fgE) )<sup>2</sup>

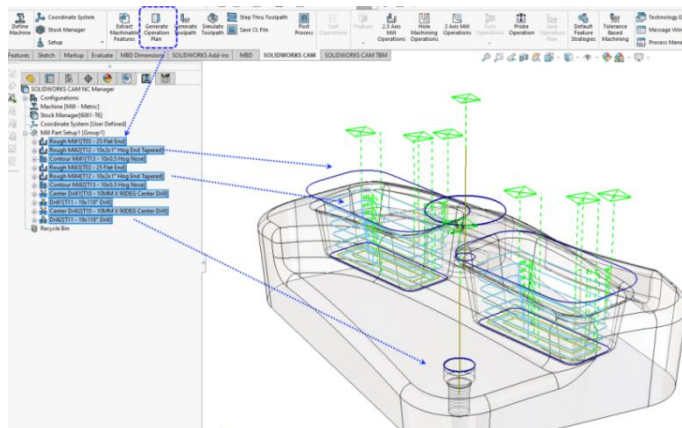
4. У фази избора алата методе вештачке интелигенције се већ користе интензивно за „вођену претрагу” великих база података о алатима и режимима обраде у потрази за оптималним алатом и режимима обраде. У овом случају се најчешће користи помоћ

<sup>2</sup> <https://synth.ai.sws.siemens.com>

тзв. *експертских система* (унапред утврђена правила која имплицитно у себи садрже знање експерта у претрази база података).



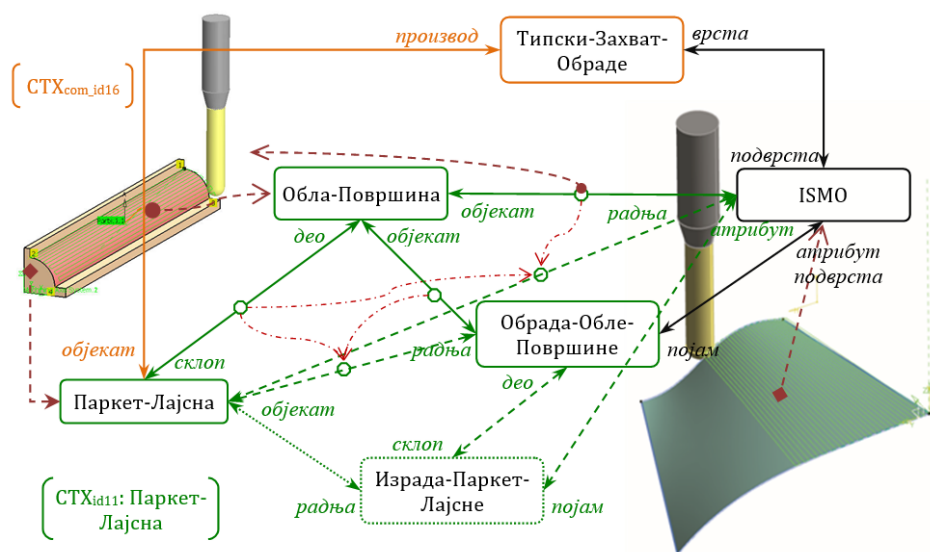
**Слика 8-3** Приказ аутоматског препознавања обрадне геометрије и семантичке категоризације делова геометрије издатка у контексту моделирања операција обраде у CAM модулу SolidWorks PLM софтвера.



**Слика 8-4** CAM модул самостално препознаје и моделира захвате обраде који се могу применити и при томе самостално бира алате, и режиме обраде.

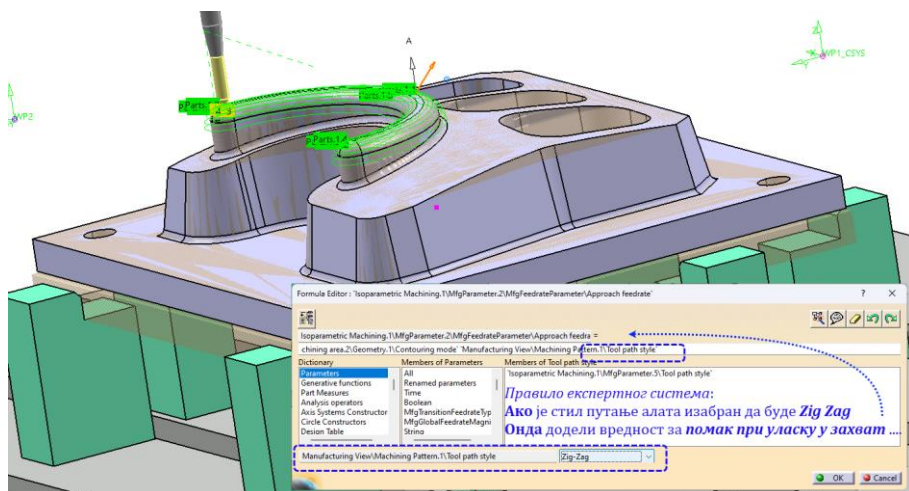
5. Методе ВИ се могу користити приликом моделирања захвата:

- а) ВИ методе закључивања на основу аналогија се могу користити за аутоматизовану категоризацију одредишне површине и на основу те категоризације, ВИ може донети одлуку о врсти захвата који је могуће применити (Слика 8-5);



**Слика 8-5** Приказ коришћења аналогија топологија семантичких мрежа којима се описују и препознају геометријске одлике обрадних површина, а са циљем доношења одлуке о избору врсте захвата који треба применити.

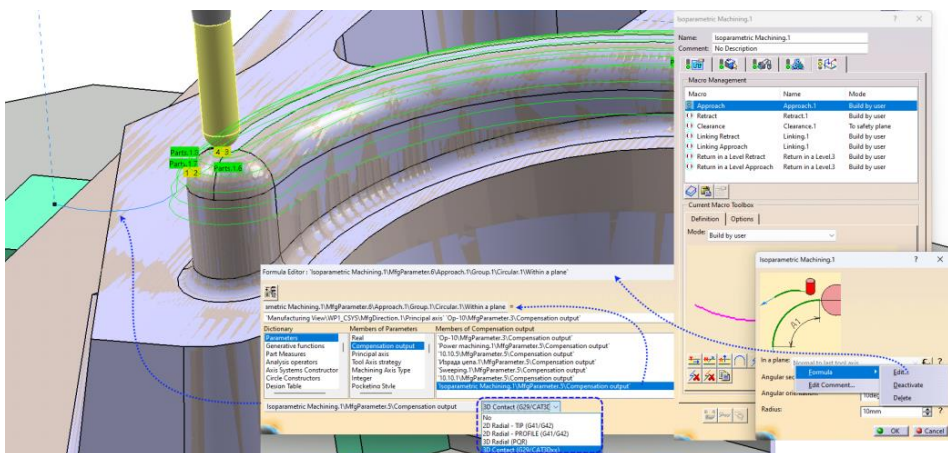
- б) одређивање алата и технолошких параметара (интелигентно претраживање базе података према експертским правилима уграђеним у саме CAPP/CAM апликације (Слика 8-6);



**Слика 8-6** Приказ уноса логичног израза (правила) за доделу вредности помака на делу путање када алат улази у захват у зависности од изабраног стила путање главног кретања.

в) утврђивање путање алата:

- утврђивање оптималне комбинације параметара који дефинишу одлике релативног кретања алата и обратка спреам производних ограничења и
- избора помоћних улазно излазних кретања алата у захвату (Слика 8-7).



**Слика 8-7** Приказ уноса логичног израза (експертског правила) за доделу вредности параметра који контролише нагиб алата приликом уласка у захват на основу услова – каква се радијална компензација алата користи.

6. Помоћ метода ВИ могу се користити приликом спровођења извршних програма:

- а) методе ВИ које се заснивају на статистичкој обради велике количине података (*машинско и дубоко учење*) су обично оптималан избор за обраду података који стижу са многобројних сензора у зони обраде, али и са оних сензора у зони припреме (нпр. стање у магацину). Веома је корисно да се резултати обрада тих великих скупова података ефектно презентују оператерима и руководиоцима производних процеса јер је људима веома тешко да уоче битне међузависности над великим скупом „сирових података”.
- б) ВИ нуди идеалан скуп алата за аутоматизацију редоследа операција и захвата у циљу остваривања максималне искоришћености опреме (ради унапређења продуктивности). У овом домену, методе вештачке интелигенције могу неупоредиво брже, у односу на човека, срачунати који редослед операција и захвата може остварити поменуту

максималну искоришћеност како алата, тако машине или групе машина (погон). И у овој апликацији, *машинско учење* спада у први избор метода ВИ које треба размотрити за примену.

- в) Постпроцесирање моделираних операција у извршне програме без грешака је изазов за који се очекује да методе ВИ могу савладати, такође. Програмски модули са уграђеним методама ВИ су у стању да брзо и сигурно утврде разлике између модела операција и симулираних резултата одговарајућих извршних програма.

На крају овог кратког осврта на примене метода ВИ у моделирању операција НУ машина треба истаћи да су најчешће методе ВИ које се користе:

1. експертска правила (експертни системи);
2. машинско учење;
3. неуронске мреже;
4. семантичке мреже (са предикатском логиком и доменским скупом правила) и
5. закључивање на бази аналогича.

## 8.2 ПРОШИРЕНА СТВАРНОСТ У *CAM*

Иако је тема проширене стварности већ поменута у овом поглављу, следи кратак преглед примене ових технологија у сврхе моделирања и виртуелизације технолошких операција.

Проширена стварност или проширена реалност две су одреднице које означавају исту технологију, а које су настале од енглеске кованице *Augmented Reality (AR)*. Најчешће коришћено објашњење *AR технологије* је оно које се односи на њену могућност додавања и виртуелизације дигиталних садржаја у визуелно и хаптичко поље човека, чиме му се ствара утисак да су ти дигитални садржаји део реалног света (стварности). Ова функција *AR технологије* допушта кориснику знатно детаљнији визуелни и звучни доживљај света у коме се налази.





а)



б)

**Слика 8-8** Приказ скоро потпуног поклапања виртуелног објекта са реалним објектом у простору: (а) поглед на објекат кроз дисплеј таблет рачунара и (б) приказ унутрашњости склопа.

Додатно, помоћу различитих уређаја, контролера или самих покрета руку (које хардвер препознаје као одређене команде), корисник може интераговати са *AR* уређајима чиме се обезбеђује двосмерна комуникација (уређај – човек и човек – уређај). Врло је важно одмах направити разлику између *AR-a* и технологије са којом се често повезује – *VR технологије*. *VR технологија* (технологија виртуелне реалности/стварности – *Virtual Reality*) допушта кориснику да се потпуно „пресели” у дигитални свет (Слика 8-9). Уз помоћ рачунара, специјалних уређаја (хардвера) и програмских апликација (софтвера) *VR* у реалном времену генерише виртуелно окружење које кориснику пружа стимулацију различитих чула и тиме успева „заварати” корисника да је то виртуелно окружење стварно. Другим речима, скупом различитих визуелних, звучних и хаптичких искустава, *VR* „закупља” чула корисника и пружа му илузију да се налази у дигиталном свету. Слично као и код *AR-a*, двосмерна комуникација (уређај – човек и човек – уређај) је обезбеђена помоћу различитих помоћних уређаја/управљача или самим покретима руку.





а)

б)

**Слика 8-9** Приказ секвенце формирања дигиталног окружења за виртуелизацију на AR визир. На делу слике (а) је снимак лабораторије, а на делу слике (б) је изграђени дигитални садржај истог окружења.

### 8.2.1 КРАТКА ИСТОРИЈА AR-а

*Ivan Sutherland* и његови студенти са Харварда (*Harvard University*) и Универзитета у Јути (*University of Utah*), у САД-у, направили су прве прототипове *AR-a* 60-их година 20. века. Али, у то време, одредница *Augmented Reality* још није постојала. Она се први пут појављује тек почетком 1990. године, када су *Caudell* и *Mizell*, два научника из *Boeing Corporation-a*, направили експериментални *AR* систем који је помагао радницима око жичаних инсталација. Ово и даље није био *AR* систем у оном облику какав нам је данас познат. Последњих година 20. века процесорска снага рачунара била је довољно велика да је виртуелизација дигиталног садржаја у реалном времену постала могућа уз употребу малих и ергономичних електронских уређаја. *AR* све више заокупља пажњу истраживача и од тада почињу да се организују прве научне конференције и симпозијуми посвећени овим технологијама. Данас се обично наводи да *AR* представља један од „девет стубова индустрије 4.0” и очекује се да ће заузимати важну улогу у развоју како производне индустрије, тако и туризма, забаве, индустрије видео игара итд.

### 8.2.2 КОМПОНЕНТЕ AR-а

Како би се *AR* могао користити, неопходно је имати четири важне компоненте:

- приказивач (*Display*) или побуђивач – уређаји који приказују дигитални садржај одговарајућим побуђивањем чула корисника;
- систем за праћење (*Tracker*) - пре него што *AR* систем може приказати виртуелни свет у реалном, мора имати могућност да

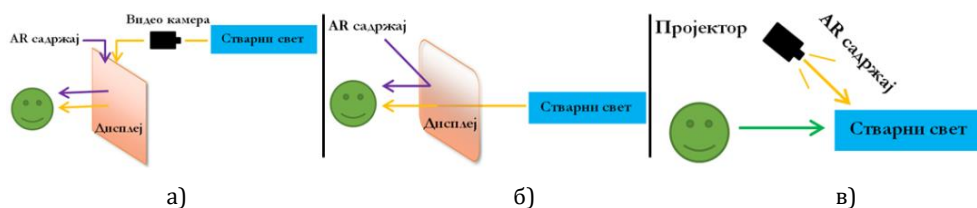
препозна окружење у којем се налази и да прати релативно кретање корисника у том окружењу, то се постиже помоћу компонената за праћење;

- рачунар за обраду графичког дигиталног садржаја (Graphics computer) и
- рачунарска програмска апликација - AR система (софтвер).

Када се говори о дисплејима (приказивачима), најчешће се мисли на визуелне дисплеје (визире/наочаре и LCD екране), али овде спадају и остале врсте побуђивача чула, нпр. звучни и додирни. Приказивачи и побуђивачи се могу класификовати у зависности од њиховог начина рада и релативне позиције коју приказивач има у односу на корисника:

Према начину рада, приказивачи и побуђивачи могу бити:

- Визуелни (Visual):
  - *видео-прозирни (Video see-through)* – дисплеј који камером снима окружење, а затим репродукује снимак на визир корисника у реалном времену са додатим AR садржајем (Слика 8-10 -а);
  - *оптички прозирни (Optical see-through)* – не дигитализују стварни свет, већ се само на визир пројектује дигитални AR садржај (Слика 8-10 -б);
  - *пројективни (Projective)* - пројектују дигитални AR садржај директно на стварни свет, тако да га свако може видети (Слика 8-10 -в);



**Слика 8-10** Типови визуелних приказивача:

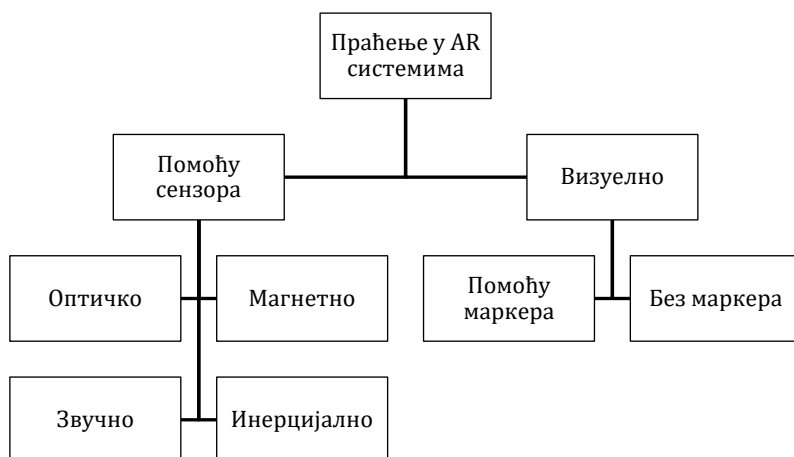
(а) видео-прозирни, (б) оптичко-прозирни, (в) пројективни.

- *звучни (Acoustic, Aural)*;
- *тактилни или додирни побуђивач (Haptic)*;
- остали побуђивачи који се веома ретко користе:
  - *побуђивачи чула мириса (Olfactory)*;
  - *побуђивачи чула укуса (Gustatory)*.

Према начину ношења, односно позиције на кориснику, приказивачи и побуђивачи могу бити:

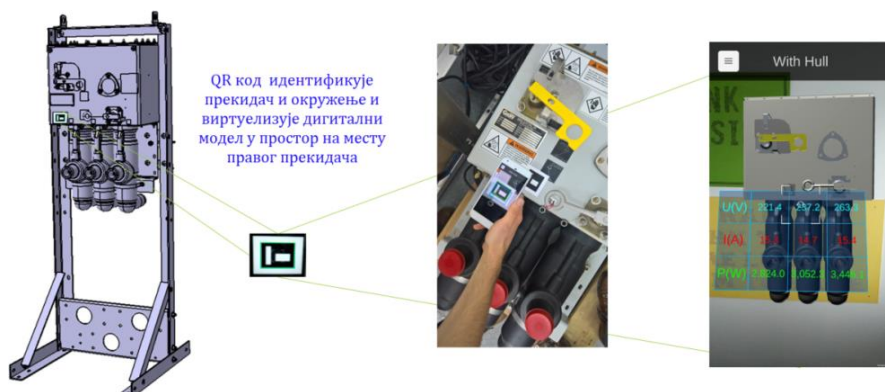
- они који се носе на глави (*Head-worn*) – приказивач из ове групе је обично у облику наочара или визира које корисник носи на глави при коришћењу:
  - приказивач који се носи на глави (*Head-mounted display - HMD*);
  - приказивач за виртуелни приказ на мрежњачи (*Virtual retinal display - VRD*) - оптичка пројекција се шаље директно на мрежњачу ока и
  - пројектори који се носе на глави (*Head-mounted projective display - HMPD*);
- приказивачи и побуђивачи који се носе у/на руци (*Hand-held*) – ради се обично о некој врсти мобилних уређаја или таблета којима се лако рукује:
  - видео дисплеј или оптички прозирни дисплеј (*Hand-held video/optical see-through display*);
  - пројектор који се носи у руци (*Hand-held projectors*) и
  - рукавице;
- специјални просторни приказивачи (*Spatial*) – обично се користе за презентације пред широким аудиторијумом, где није потребна интензивна интеракције са корисницима:
  - приказивач у облику прозирног видео екрана (*Screen-based video see-through display*);
  - специјални просторни оптички прозирни дисплеј (*Spatial optical see-through display*);
  - специјални просторни пројектор (*Projective display*).

Пре него што *AR* систем може приказати *AR* садржај кориснику, уређај мора препознати где се налази у простору, односно, где треба поставити (суперпонирати) виртуелне објекте и ту их задржати независно од релативног кретања корисника. Ово је врло сложен задатак, чак и за веома напредне графичке процесоре и назива се проблем *праћења* (*tracking*). У току праћења је потребно одредити шест слобода кретања - три променљиве за позицију (по *x*, *y* и *z* оси) и три променљиве за угао. Коначно, потребно је да се у реалном времену прате оптичке аберације оптичког система *AR* уређаја и убаце у срачунавање приказа дигиталног садржаја у реални простор. Постоје неколико техника којима се помаже рачунарској апликацији *AR* система да обавља овај задатак - Слика 8-11.



**Слика 8-11** Начини праћења у AR системима зависно од типа сензора.

За оптичко праћење се користи видео камера. С обзиром на то да су оптички сензори осетљиви на оптички шум (стимулусе из окружења који ремете праћење), ова врста праћења је корисна само у контролисаним условима. У праћењу помоћу магнета, магнетна поља се стварају и на основу њихове промене се одређује позиција уређаја у простору. Ултразвучни таласи се користе код праћења помоћу звука, а позиција се одређује рачунањем времена које је потребно да ултразвучни талас дође до уређаја који се прати. Праћење помоћу инерције се врши преко сензора кретања. Код праћења базираног на визији, најлакше је извести праћење помоћу маркера. За маркер се обично узима неки облик који је артифицијелно постављен у окружењу и који је лако препознатљив. Чим камера препозна маркер, дигитални садржај се суперпонира на реалном окружењу, у тачно претходно дефинисаном положају (Слика 8-12 и Слика 8-8).



**Слика 8-12** Уметање објекта у визуелно-хаптичко поље корисника на основу маркера у виду QR кода.

Праћење без маркера је пак доста компликованије, с обзиром на то да се позиционирање врши на основу облика који се налазе у реалном окружењу, што подразумева укључивање метода вештачке интелигенције за препознавање појединих објеката и тај приступ је, са становишта рачунарске обраде података, знатно тежи у поређењу са праћењем које се заснива на постављеним маркерима.

Праћење у *AR* системима зависи и од окружења, тј. да ли се *AR* систем користи унутра (*Indoor*), где је обично контролисаније окружење или споља (*Outdoor*), где је окружење непредвидиво, а услови праћења лошији. Праћење унутра се обично постиже на један од два начина: *споља ка унутра* (*outside-in*), када су сензори фиксирани на објектима у окружењу, а објекат који се прати (нпр. дисплеј који се носи на глави) се налази на кориснику; или *праћење од унутра ка споља* (*inside-out*) које се изводи тако што се сензори налазе фиксирани на *AR* уређају код корисника, док су различити објекти који се прате релативно у односу на корисника (тј. *AR* уређаја) налазе у окружењу, при чему је могуће помоћи праћење фиксирањем маркера на те објекте. Код праћења споља (*Outdoor*) систем одређивања глобалне позиције (*GPS*) се обично користи као поуздана опција.

### **8.2.3 ПРИМЕНА *AR*-а**

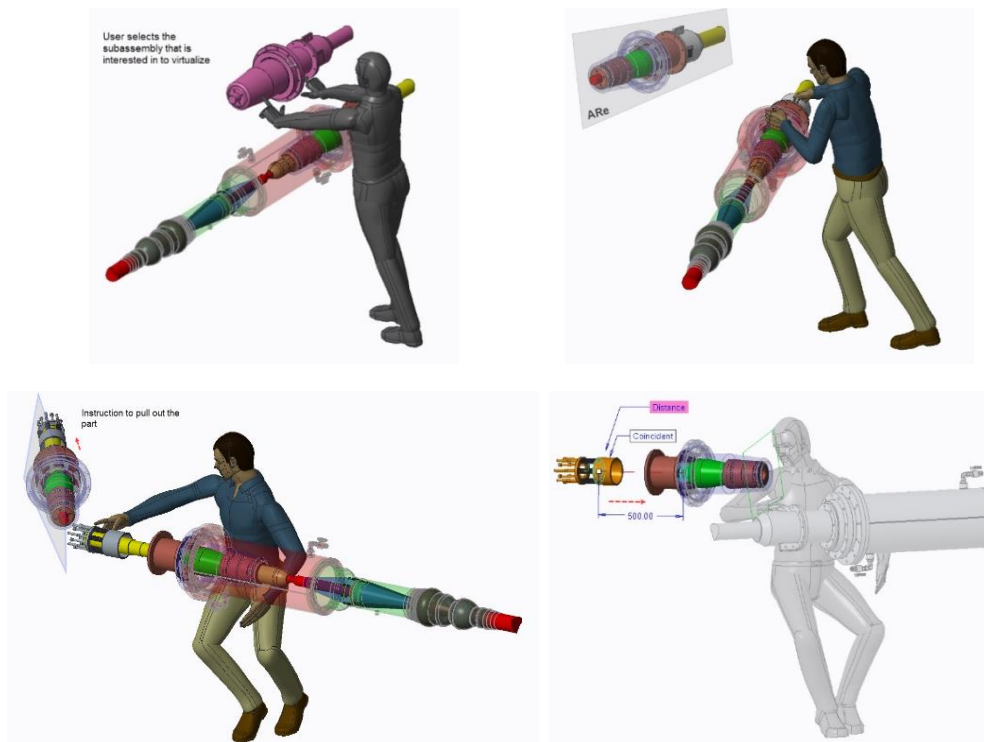
Као што је претходно речено, *AR* је један од девет стубова индустрије 4.0 и, као такав, има широку примену. Иако се може користити као помоћ при навигацији, у туризму, медицини, у видео играма и различитим облицима забаве, нама је најзначајнија примена у индустрији. Неке од примена *AR*-а у индустрији јесу:

- монтажа,
- одржавање,
- тренинг,
- инспекција производа,
- дизајн производа,
- техничка подршка на даљину,
- роботика и
- сигурност у радном окружењу.

#### **8.2.3.1 Моделирање технолошких операција за *AR***

Најочигледнија примена *AR*-а у индустрији се налази у виртуелизацији упутстава за монтажу, одржавање и тренинг. Ова упутства су обично припремљена у 2D приказу за уређаје који могу визуелизовати дигиталне садржаје, као што су таблети и телефони, или могу бити одштампана на папиру. У појединим случајевима, такав начин презе-

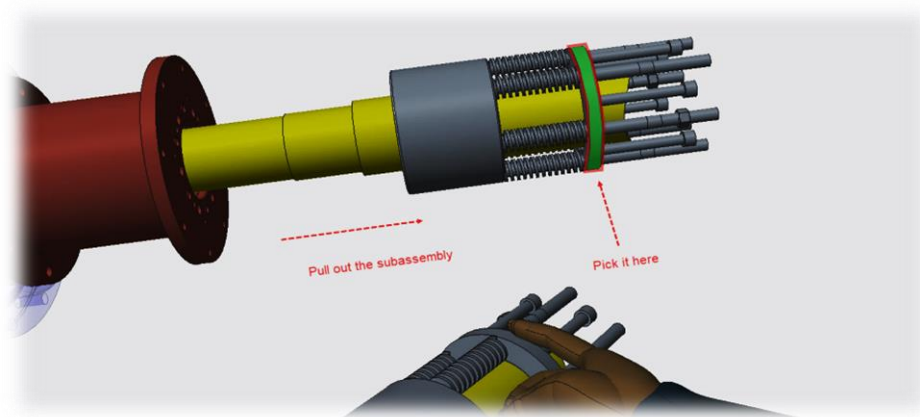
нтације и коришћења упутстава може се учинити компликованим, с обзиром на то да радник мора непрестано мењати фокус са упутстава на машину/производ и обрнуто. Суперпонирање потребних информација кроз неки од *AR* уређаја у визуелно-хаптичко поље оператера може знатно увећати продуктивност и осигурати ваљаност обављене радње. У неким случајевима може доћи и до 27% убрзања процеса одржавања са *AR* уређајима у односу на коришћење конвенционалних папирних упутстава. *AR* упутства за монтажу и одржавање су већ широко примењена.



**Слика 8-13** Моделирање сцене које су повезане са одређеним захватима из упутства о монтажи.

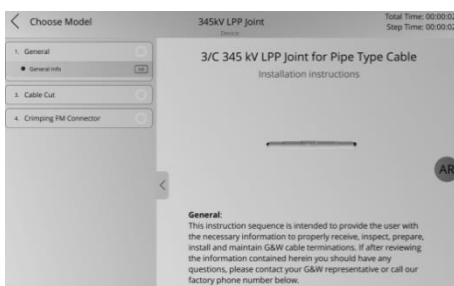
На сликама (Слика 8-13 и Слика 8-14) је приказан низ корака моделирања захвата и операција монтаже високо напонске спојнице које се обавља у посебним *CAD/CAM/AR* модулима<sup>3</sup> намењеним за креирање *AR* садржаја и сценарија.

<sup>3</sup> Модели су развијани у Creo PLM софтверу, а за уређење дигиталног садржаја и формирања *AR* сценарија коришћена је *AR Development* платформа Unity.

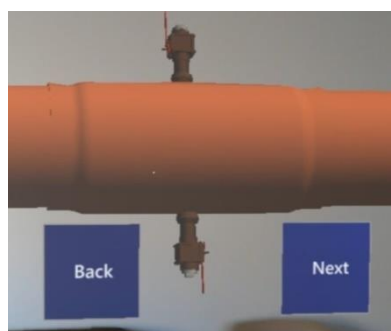


Слика 8-14 Симулација AR садржаја кроз визир.

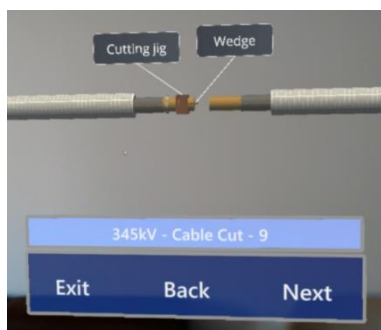
На сликама Слика 8-15 се може видети како изгледају поједине секвенце у операцији монтаже високо-напонске спојнице - одабиром одговарајуће операције.



а)



б)



в)



г)

Слика 8-15 Приказ виртуелног садржаја (објекта – високо-напонска спојница) у операцији инсталације/монтаже.



Следи листа инструкција која се приказује испред очију корисника кроз *AR* уређај: (а) улазни мени приказан на визиру – избор операције, (б) учитавање иницијалног објекта и започињање приказивања *AR* садржаја, (в) операција припреме спојнице (уметање клина...) и (г) одговарајућа операција која се реализује у стварности. Након обављене радње према одређеној инструкцији, уређај може аутоматски детектовати успешно обављену радњу или, пак, сам радник може одабрати да се настави са следећим коракном.

*AR* се такође може користити и за инструкције при коришћењу *HU* машина (Слика 8-16). Слично као и код инструкција за одржавање, тренинг или монтажу, кроз *AR* уређаје се може приказати моделирани технолошки поступак резања, као и инструкције које су у вези са радњама које треба обавити да би се *HU* машина покренула и обавила моделиране операције и захвате. Приказивањем одговарајућих упутстава, слика, видео записа, осветљавањем потребних алата, командних дугмади или осталих елемената машине, оператеру се олакшава руковања *HU* машином. Такође, примена *AR* технологије може допринети унапређењу безбедности радника на радном месту приказивањем упозорења у правом тренутку (нпр. када радник прилази опасној зони машине).



а)



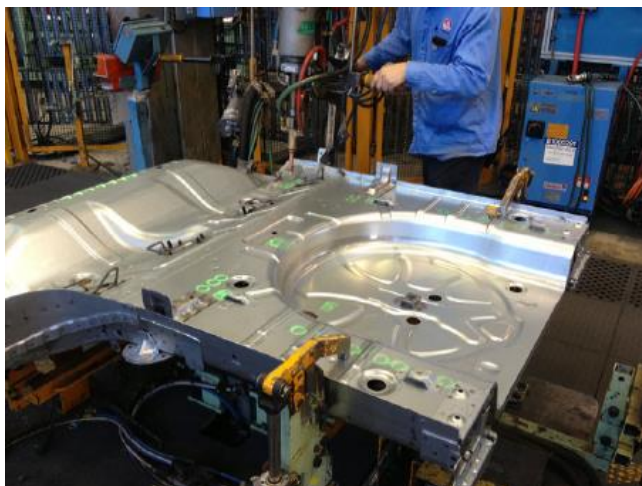
б)

**Слика 8-16** Приказ секвенце инструкције за рад са *HU* машином коју корисник добије преко *AR* визира (а); упозорење које *AR* уређај пружа оператеру спрам његове позиције у односу на *HU* машину (б).<sup>4</sup>

*AR* такође може помоћи и у самим процесима производње. То се може видети при заваривању различитих елемената. Коришћењем пројективних дисплеја (*Projective*) се знатно може смањити време потраге за местима где је потребно извршити заваривање. Слика 8-17 приказује

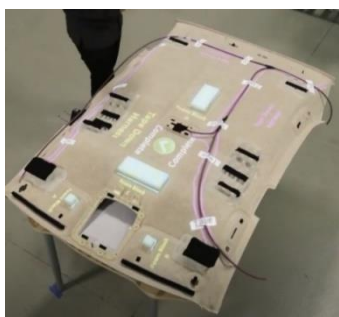
<sup>4</sup> Преузето са <https://www.youtube.com/watch?v=-uwCGA22iNM>

пример из аутомобилске индустрије. Током тестирања, постигнуто је смањење грешака при ручном заваривању од 52%.

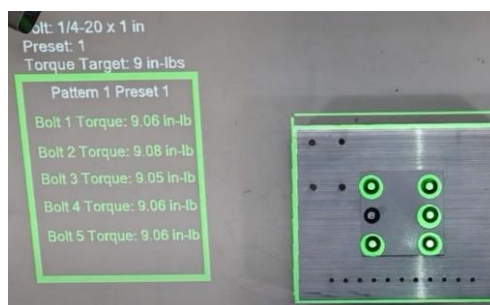


**Слика 8-17** Приказ секвенце навођења заваривача на позиције које треба заварити помоћу пројектора и приказивача *AR* технологије.

Такође, у случајевима, када је потребно пронаћи одређени сегмент машине, производа (или било код другог објекта над којим се врши извесна обрадна операција), употребом различите врсте виртуелних назнака, стрелица, етикета које ће *AR* уређај виртуелизовати на правим местима, може се усмерити фокус корисника на одговарајући елемент (Слика 8-18).



а)

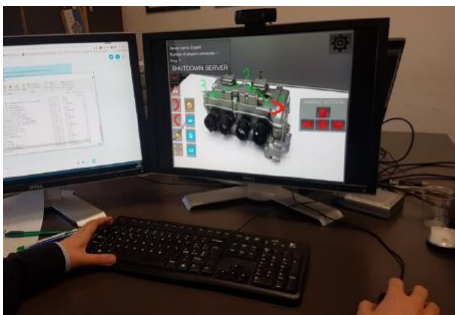


б)

**Слика 8-18** Примери усмеравања пажње корисника на одговарајући елемент на производу, помоћу пројектора у складу са листом инструкција на визиру.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Сlike су преузете са (а) <https://www.youtube.com/watch?v=1nFDtjhgAJo> и (б) <https://www.youtube.com/watch?v=4V0lkBlynPo&t=3s>.

Још један изазов који се често јавља у производним окружењима јесте да у одређеном тренутку производње, када дође до застоја услед појаве неког изузетка - отказа опреме или немогућности да се извршни програм учита у НУ машину, нема одговарајућих стручних оператера који би могли отклонити квар или грешку. Непланирани застој у производњи на неколико сати па и дана представља велики губитак за предузеће и умањење кључних показатеља учинка технолошког система. Како би се квар отклонио, потребно је довести експерте који умеју решити проблем. Одговарајући експерти могу бити заузети другим операцијама и не могу доћи на место квара, а некада експерте треба довести из других компанија које се налазе у другим градовима или државама. Операција техничке подршке у оваквом сценарију је идеална за примену удаљене техничке подршке и операција одржавања путем *AR* технологије. У овим случајевима, могуће је вршити подршку непосредно у реалном времену или након што се генерише модел операције која ће довести у исправно стање опрему и потом тај модел операције може бити приказан преко *AR* визира оператерима у предузећу које има застој.



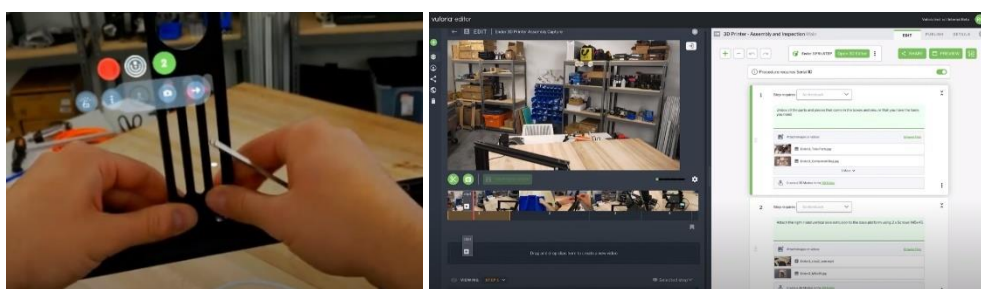
**Слика 8-19** Приказ пружања техничке подршке у одржавању опреме даљински путем припреме модела технолошке операције за *AR* дисплеј (у овом случају то је таблет рачунар).

Како би се олакшао поступак припреме *AR* садржаја и презентације, постоје посебне рачунарске апликације које олакшавају прављење *AR* презентација (упутстава за операције обраде, монтаже, одржавања или за тренинг нових радника). Имајући у виду да израда и моделирање сценарија за *AR* презентацију захтева доста времена, ово је посебно значајно. Једна од таквих апликација је *Vuforia Expert Capture*<sup>6</sup>. Начин припреме материјала коришћењем овог и њему сличних софтвера је такав да се моделирање операција обавља на основу „снимака” активности приликом обављања операција у стварности и каснијег претварања тих снима-

---

<sup>6</sup> <https://developer.vuforia.com>

ка у анимиране дигиталне садржаје који се могу виртуелизовати у стварни простор. Оператер који је упознат са процесом носи *AR* уређај на глави док обавља одговарајућу технолошку операцију (за коју се спрема упутство); у уређају се бележи позиције објекта од интереса у амбијенту ћелије технолошког система, као и цео амбијент, а уз то бележе се кретање самог оператера и његових активности (нпр. помоћу тактилних побуђивача - рукавица); оператер након „снимања“ операције врши уређивање дигиталног садржаја који ће бити суперпониран у визуелно-хаптичко поље на начин који му се чини најприкладнијим (ергономичним). Овакав поступак у великој мери скраћује време потребно за формирање *AR* упутстава за операције монтаже (Слика 8-20)<sup>7</sup>.



а)

б)



в)

**Слика 8-20** Процес прикупљања садржаја уз помоћ *Vuforia Expert Capture* (а); процес обрађивања садржаја приказан на слици (б); коришћење створене *AR* инструкције од стране невештог радника (в).

<sup>7</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=Hx7AScAtkNE>

Најзад, може се констатовати да се интеграцијом *AR*-а са осталим „стубовима индустрије 4.0“, као што су интернет ствари (*Internet of Things*), обрада и анализа података у облаку (*Cloud computing and analytics*), вештачка интелигенција (*Artificial Intelligence*), а посебно машинско учење (*Machine learning*), могу досегнути виши нивои продуктивности и квалитета у спровођењу производних процеса.

Имајући у виду свеприсутност рачунара и других електронских уређаја као и рачунарских апликација и њихове улоге у управљању и контроли спровођења технолошких процеса, више је него јасно да моделирање технолошких операција уз помоћ *CAPP/CAM* апликација и *AR* заузима централно место у скупу делатности које остају човеку у будућим производним окружењима.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an industry 4.0 context: The role of augmented reality and additive manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516-526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- Doshi, A., Smith, R.T., Thomas, B.H., & Bouras, C. (2017). Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 1279-1293. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9164-5>
- Galar, D., Daponte, P., Kumar, U. (2020). *Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems* CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9780429455759>
- Gilchrist, A., (2016). *Industry 4.0, The Industrial Internet of Things* (1<sup>st</sup> ed.). Apress Berkeley, <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>
- [\*Maintenance in Aeronautics in an Industry 4.0 context: The Role of Augmented Reality and Additive Manufacturing\* \(2019\)](#)
- [\*Maintenance in Aeronautics in an Industry 4.0 context: The Role of Augmented Reality and Additive Manufacturing\* \(2019\)](#)
- Masoni, R., Ferrise, F., Bordegoni, M., Gattullo, M., Uva, A.E., Fiorentino, M., Carrabba, E., & Donato, M.D. (2017). Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality. *Procedia Manufacturing*, 11, 1296-1302. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Zogopoulos, V., & Fotini, X. (2017). Integrated production and maintenance scheduling through machine monitoring and augmented reality: An industry 4.0 approach. *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing . APMS 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 513. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_42)
- Stojkovic, M., Turudija, R., Trifunovic, M., Pavlovic, M., Jovanovic, I., Uzelac, N., Milenkovic, V., (2022), A Study Of The Use Of Mixed Reality For Capturing Human Observation And Inferences In Production Environments, *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering OnlineFirst*, ME doi: 10.22190/FUME220714047S
- [\*Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality\* \(2017\)](#)
- Trifunović, M., Stojković, M., Trajanović, M., Manić, M., (2015). Semantic interpretation of geometric and technological features. Chapter 11 In: Cus, F., Gecevska, V., Chiampo, F. eds., *Methods and techniques for industrial development*, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering in Maribor and Politecnico di Torino, ISBN 978-961-248-493-4, 145 - 165,
- Use of Projector Based Augmented Reality to Improve Manual Spot-welding Precision and Accuracy for Automotive Manufacturing (2016)
- Van Krevelen, D.W.F., & Poelman, R. (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1-20. <https://doi.org/10.20870/IJVR.2010.9.2.2767>
- Стојковић, М. (2011). Анализа параметара технологичности на основу семантичких структура дигиталног модела производа. *Докторска дисертација*, Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу.

## 9 ДОДАТАК

---

Списак слика

Списак табела

Списак одредница





## Списак слика

<b>Слика 1-1</b> Разврставање чланова технолошког процеса (процеса обраде или спровођења обраде) .....	1-3
<b>Слика 1-2</b> Приказ техничког цртежа у 2D (а) и 3D (б) дигиталним представама.....	1-5
<b>Слика 1-3</b> Детаљ са операцијског листа машинске обраде на стругу (конвенционални приступ) .....	1-8
<b>Слика 1-4</b> Приказ развоја <i>CAPP/CAM</i> апликација и њихове трансформације у две класе софтвера током времена .....	1-13
<b>Слика 2-1</b> Пећ за жарење алуминијумских одливача - трупца (Alu Holding, Ниш).....	2-18
<b>Слика 2-2</b> Погон површинске заштите (Alu Holding, Ниш). .....	2-19
<b>Слика 2-3</b> Пример приказа путање глодала и симулације кретања (алата/радног стола) у <i>CAM</i> модулу <i>Catia V5 PLM</i> софтвера. ....	2-21
<b>Слика 2-4</b> Приказ симулације тзв. 4-осног електро-ерозионог сечења жицом користећи 2 путање у две (XY) равни помоћу две различите <i>CAM</i> апликације а) <i>Master CAM</i> и б) <i>Sprut CAM</i> .....	2-21
<b>Слика 2-5</b> Приказ секвенце у процесу моделирања кретања и подешавања оријентације ласерске главе при том кретању ( <i>Tebis CAM</i> апликација).....	2-22
<b>Слика 2-6</b> <i>CAM</i> софтвер намењен планирању и симулацији операција савијања лимених припремака у кутије/кућишта ( <i>Master Bend CAM</i> , <i>IMTS</i> ). ....	2-22
<b>Слика 2-7</b> Приказ секвенце у симулацији технолошког поступка савијања лима ( <i>MBend</i> <i>CAM</i> апликација, <i>Metalix</i> ). ....	2-23
<b>Слика 2-8</b> Приказ корака у моделирању распореда алата помоћу <i>CAM</i> апликације за плани- рање операција пробијања и просецања ( <i>Wi CAM</i> ). ....	2-24
<b>Слика 2-9</b> Приказ корака у подешавању геометрије тзв. носеће структуре помоћу <i>CAM</i> модула намењеног изради делова адитивним технологијама наношењем ма- теријала у слојевима ( <i>Additive Manufacturing CAM</i> модул <i>NX PLM</i> , <i>Siemens</i> ). ....	2-25
<b>Слика 2-10</b> Приказ секвенце моделирања путање роботске руке којом се обавља операција заваривања помоћу <i>CAM</i> модула <i>3DExperience PLM</i> софтвера - <i>Delmia</i> .....	2-25
<b>Слика 2-11</b> Приказ симулације уливања растопљеног материјала у калупну шупљину помоћу <i>CAE/CAM</i> програмске апликације ( <i>Mold Flow Advisor</i> , <i>Autodesk</i> ).....	2-26
<b>Слика 2-12</b> <i>DMG Mori Lasertec 125 3D</i> је пример хибридне машине алатке која може да обавља операције 5-осног глодања и додавање материјала по слојевима. ....	2-27
<b>Слика 2-13</b> Приказ моделирања захвата „скенирања” геометријских и димензионих одсту- пања изабраних геометријских места и рупа на кућишту ( <i>MiCAT Planner</i> , <i>Mitutoyo</i> ).....	2-27
<b>Слика 2-14</b> Место примене <i>CAPP</i> , <i>CAM</i> и <i>Production Planning and Scheduling</i> апликација .....	2-28
<b>Слика 2-15</b> Приказ окружења <i>Asprova CAPP</i> апликације која је намењена планирању про- изводње тзв. <i>Production Planning and Scheduling (PPS)</i> . ....	2-30
<b>Слика 2-16</b> Приказ (а) окружења за разраду просторног распореда опреме технолошког система у <i>Delmia 3DExperience</i> као дела процеса планирања производње и (б) окружења <i>Delmia Ortems</i> за планирање временског редоследа спровођења технолошких операција ( <i>Dassault Systems</i> ). ....	2-30
<b>Слика 2-17</b> Приказ „фазе припреме” варијантног <i>CAPP</i> система, односно стварање збирке узорних примера стандардних технолошких поступка за дати технолошки систем. ....	2-32

<b>Слика 2-18</b> Приказ „фазе примене” варијантног <i>CAPP</i> система, односно моделирања технолошког поступка за стварни део на основу узорних примера стандардних технолошких поступка.....	2-33
<b>Слика 2-19</b> Приказ рада <i>CAPP</i> система који користи тзв. генеративни приступ.....	2-36
<b>Слика 2-20</b> Приказ секвенце када алгоритми <i>CAM</i> апликација врше препознавање појединих геометријских техничких елемената (тзв. отворених удубљења или „отворених цепова”), а потом и њихову категоризацију у погледу операције машинске обраде резањем која се може препоручити: а) Solid <i>CAM</i> iMachining AF, б) NX <i>CAM</i> Feature Based Machining).....	2-38
<b>Слика 2-21</b> Препознавање и кориговање обрадних површина и њихова категоризација према врсти захвата која се може применити.....	2-39
<b>Слика 2-22</b> Схема информатичко-комуникационе инфраструктуре савремених сајбер-физичких производних система у којој се инсистира на интензивној комуникацији између машина и <i>IIoT</i> - „ <i>machine to machine</i> ” ( <i>M2M</i> ) комуникација.....	2-42
<b>Слика 2-23</b> Приказ дела погона опремљеног DMG Mori CNC машинама.....	2-43
<b>Слика 2-24</b> Приказ заглавља датотеке која „чува” податке о 3D геометрији дела као и остале релевантне податке као што су квалитет површине и толеранција облика.....	2-44
<b>Слика 2-25</b> Приказ протока и обраде податка у процесу моделирања технолошког поступка.....	2-45
<b>Слика 2-26</b> Приказ директне размене података између различитих <i>CAx</i> апликација.....	2-47
<b>Слика 2-27</b> Приказ примера размене података између различитих <i>CAx</i> апликација преко неутралног, стандардног формата STEP.....	2-48
<b>Слика 2-28</b> Визуелизација одлика објеката који су формиран у <i>CAx</i> апликацији.....	2-48
<b>Слика 2-29</b> Приказ ознака дозвољених одступања називних мера и облика као и квалитета и начина добијања површина на објекту (Catia).....	2-49
<b>Слика 2-30</b> Приказ *.dxf датотеке са 2D контурама по којима ће вршити исецање.....	2-49
<b>Слика 2-31</b> Приказ коришћења 2D контуре записане у DXF формату као референце за формирање путање алата; (а) извор: DXF-Reader with SINUMERIK (б) извор: Zefer Yerkazan.....	2-50
<b>Слика 2-32</b> Рељеф (3D модел) изграђен од 2D слојева дефинисаних ободним контурама.....	2-50
<b>Слика 2-33</b> Приказ поступка превођења 3D модела објекта из <i>CAD</i> апликације у <i>CAM</i> апликацију, чији су припадајући (нативни) формати датотека међусобно некомпатибилни, преко неутралног, стандардног STEP формат записа.....	2-51
<b>Слика 2-34</b> Приказ CL датотеке записане у APT синтакси и одговарајуће датотеке NC датотеке записане у ISO 6983 формату (G-коду).....	2-55
<b>Слика 2-35</b> Приказ једног у низу корака којим се подешава речник са инструкцијама превођења (пост-процесирања) G-Post.....	2-56
<b>Слика 2-36</b> Приказ симулације 5-осног глодања у I <i>CAM</i> -овом <i>CAM</i> верификатору ( <a href="https://icam.com">https://icam.com</a> ).....	2-57
<b>Слика 2-37</b> Приказ симулације поступка верификације G-кода за обраду цилиндричних делова на обрадним центрима помоћу <i>CAM</i> верификатора интегрисаног у NX PLM ( <a href="https://www.camdivision.pl/en/services/postprocessors">https://www.camdivision.pl/en/services/postprocessors</a> ).....	2-58
<b>Слика 2-38</b> Приказ симулације извршног G-кода за случај НУ машине која наноси материјал (адитивне технологије) у <i>CAM</i> верификатору Vericut CGTech.....	2-58
<b>Слика 3-1</b> Општи алгоритам рада са <i>CAPP/CAM</i> апликацијама.....	3-65

<b>Слика 3-2</b> Структура тек формиране датотеке у Catia CAPP/CAM модулу.	3-67
<b>Слика 3-3</b> Приказ референтне геометрије (подножна површина запремине) која се користи за формирање захвата или операције глодања запремине. (Cgeo CAPP/CAM модул)	3-68
<b>Слика 3-4</b> Приказ симулације путање глодала док врши запреминско глодање према захвату формираног на основу минималног ПОГЕ.	3-68
<b>Слика 3-5</b> Приказ корака утврђивања параметара којима се дефинишу врста и одлике НУ машине у CAM модулу SolidWorks-a.	3-70
<b>Слика 3-6</b> Приказ корака утврђивања параметара којима се дефинишу врста и одлике НУ машине у CAM модулу Cgeo-a.	3-71
<b>Слика 3-7</b> Приказ корака утврђивања параметара којима се дефинишу врста и одлике НУ машине у CAM модулу Catia.	3-71
<b>Слика 3-8</b> Приказ утврђивања параметара којима се дефинишу одлике алата приликом подешавања одлика НУ машине у CAPP/CAM апликацијама - (а) Подешавање параметара геометрије алата у CAM модулу SolidWorks-a; (б) Подешавања технолошких одлика алата у CAM модулу Cgeo-a.	3-72
<b>Слика 3-9</b> Приказ уметнутог геометријског модела машине у производни склоп CAPP/CAM датотеке, који је, при томе, повезан са подешеним одликама машине.	3-73
<b>Слика 3-10</b> Приказ формирања референтних геометријских ентитета (тачака и равни) које ће бити коришћене у CAPP/CAM апликацији.	3-74
<b>Слика 3-11</b> Формирање референтне тачка издатка која ће се искористити за координатни почетак координатног система издатка/обратка/припремка W_CSYS приликом моделирања операције стругања.	3-75
<b>Слика 3-12</b> Формирање референтних тачака Производног склопа.	3-76
<b>Слика 3-13</b> Приказ оријентације координатног система издатка/обратка/припремка – тежи се кад год је то могуће да су оријентације оса координатног система издатка и машине исте.	3-77
<b>Слика 3-14</b> Прво стезање дела се одликује оријентацијом координатног система W_CSYS_1.	3-77
<b>Слика 3-15</b> Друго стезање дела се одликује оријентацијом координатног система W_CSYS_2.	3-78
<b>Слика 3-16</b> Избор одговарајућих чланова Производног склопа, координатног система операције и додатних референтних геометријских ентитета (ограничења) која ће се користити у извршном коду.	3-79
<b>Слика 3-17</b> Приказ корака формирања склопа стезног алата у CAM модулу Cgeo PLM софтвера.	3-80
<b>Слика 3-18</b> Пример посебно моделираног склопа стезног алата који одговара плану стезања осмишљеном за одговарајући технолошки поступак.	3-80
<b>Слика 3-19</b> Декларисање склопа стезног алата као опреме за причвршћивање припремака у радни простор НУ машине приликом подешавања основних елемената модела технолошког поступка.	3-81
<b>Слика 3-20</b> Симулација обраде са провером недозвољеног задирања алата у запремину припремка, издатка и стезног алата у CAM модулу Catia PLM софтверу.	3-81
<b>Слика 3-21</b> Приказ симулација са утврђивањем колизије између алата и недозвољених запремина (издатка и прибора за стезање). Симулација обраде са провером задирања у CAM модулу SolidWorks PLM софтверу.	3-82
<b>Слика 3-22</b> Подешавање опција провере недозвољеног задирања алата (и адаптера) у запремину издатка, стезног прибора и припремка обавља се у оквиру подешавања опција симулација обраде у CAM модулу Cgeo PLM софтверу.	3-82
<b>Слика 3-23</b> Приказ корака подешавања одлика машине када се бира почетна, већ претходно формирана, листа алата која ће се користити приликом моделирања операција обраде.	3-83

<b>Слика 3-24</b> Табеларна датотека ( <i>ToolsSampleMP.xlsx</i> ) у којој је скуп алата са описом одлика и вредности појединих параметара који се може „учитати” приликом конфигура- рисања машине.....	3-83
<b>Слика 3-25</b> Приказ избора препоручених режима обраде глодања (брзина резања, дубина резања и помак) за одговарајући материјал на основу ишчитаних препорука из базе података <i>CAM</i> модула <i>SolidWorks PLM</i> апликације.....	3-84
<b>Слика 3-26</b> Пример препоруке за начин израде унутрашњег навоја за случајеве операција на глодалици или стругу која обухвата редослед захвата, избор сета алата и одговарајућих режима обраде ( <i>CAM</i> модул <i>SolidWorks PLM</i> апликације).....	3-85
<b>Слика 3-27</b> Web портал <i>Snadvik Coromant</i> са тзв. <i>CoroPlus online</i> сервисима која се могу интегрисати у одговарајуће <i>CAPP/CAM</i> апликације као проширења.....	3-85
<b>Слика 3-28</b> Приказ коришћења <i>CoroPlus Library</i> сервиса који је уграђен у <i>Fusion 360 CAM</i> модул.....	3-86
<b>Слика 3-29</b> Општи алгоритам моделирања захвата.....	3-88
<b>Слика 3-30</b> Тренутни контекст обраде који инжењер мора да разуме како би осмислио целисходан технолошки поступак, операцију и захват обраде.....	3-89
<b>Слика 3-31</b> Расположиве варијанте захвата глодања на 3-осној глодалици ( <i>CAM</i> модул, <i>SolidWorks PLM</i> ).....	3-90
<b>Слика 3-32</b> Расположиве варијанте захвата глодања на 5-осној глодалици ( <i>CAM</i> модул, <i>Catia PLM</i> ).....	3-91
<b>Слика 3-33</b> Расположиве варијанте захвата глодања на 5-осној глодалици ( <i>CAM</i> модул, <i>Creo PLM</i> ).....	3-91
<b>Слика 3-34</b> Избор прикладне варијанте захвата из листе применљивих предложене у контексту изабране геометрије ( <i>контекстуални предлог</i> ).....	3-92
<b>Слика 3-35</b> Дијаграм структуре обрадне геометрије захвата.....	3-93
<b>Слика 3-36</b> Запремина која се уклања захватом и њени референтни и помоћни геометриј- ски ентитети.....	3-93
<b>Слика 3-37</b> Формирање граничне површине обједињавањем више површина са <i>CAD</i> моде- ла.....	3-94
<b>Слика 3-38</b> Формирање запремине која се уклања захватом глодања на основу обимне криве/полилиније издатка и страница припремка као спољашњих граница запремине.....	3-95
<b>Слика 3-39</b> Пример формирања запремине која се уклања захватом глодања на основу путање. Референтни геометријски ентитет је 3D крива, а помоћни геометриј- ски ентитет површина дела која ће се искористити за додатно ограничење запремине и оријентацију осе алата током преласка путање.....	3-96
<b>Слика 3-40</b> Формирање запремине која се уклања захватом одређивањем затворене обвој- не површине издатка.....	3-97
<b>Слика 3-41</b> У <i>CAM</i> модулу <i>Catia PLM</i> референтни геометријски ентитет за формирање запремине која се уклања захватом за израду отвора или рупа су ободна кружна ивица отвора или рупе на <i>CAD</i> моделу издатка или тачка у њеном центру.....	3-97
<b>Слика 3-42</b> Пример формирања обрадне геометрије рупа и отвора уз помоћ аутоматизова- ног препознавања и издвајања техничких елемената рупа и отвора на <i>CAD</i> моделу. Уједно, могуће је аутоматизовати формирање низа захвата потре- бних за израду рупе, односно отвора.....	3-98
<b>Слика 3-43</b> Одређивање помоћних геометријских ентитета који поред тога што утичу на геометрију запремине која се уклања захватом, утичу и на путању алата.....	3-99
<b>Слика 3-44</b> Формирање обрадне запремине као посебног <i>CAD feature-a</i> .....	3-100

<b>Слика 3-45</b> Приказ примене претходно формиране обрадне запремине приликом моделирања захвата.....	3-100
<b>Слика 3-46</b> Избор врсте алата као почетни корак у моделирању алата (а) <i>CAM</i> модул <i>Creo</i> <i>PLM</i> , (б) <i>CAM</i> модул <i>SolidWorks PLM</i> .....	3-101
<b>Слика 3-47</b> Приказ подешавања одлика алата у <i>CAM</i> модулу <i>Creo PLM</i> .....	3-102
<b>Слика 3-48</b> Приказ група података којима се подешавају геометријске одлике алата у <i>CAM</i> модулу <i>Catia PLM</i> .....	3-104
<b>Слика 3-49</b> Приказ група података којима се подешавају све одлике алата у <i>CAM</i> модулу <i>SolidWorks PLM</i> .....	3-104
<b>Слика 3-50</b> Приказ група података којима се подешавају технолошке и геометријске уградне одлике алата у <i>CAM</i> модулу <i>Catia PLM</i> .....	3-105
<b>Слика 3-51</b> Основне одлике путање алата и релативног кретања алата и обратка у захвату. Приказ почетног дела путање за захват 5-осног профилног глодања ( <i>CAM</i> модул <i>Catia PLM</i> ).....	3-106
<b>Слика 3-52</b> Различите варијанте захвата имају себи својствен скуп одлика којима су одређене. На сликама је приказан део одлика којим се одређује релативно кретање алата и обратка за варијанту захвата (а) фине обраде површине „пребрисавањем”, (б) грубог запреминског глодања и (в) 5-осног глодања бочне нагнуте површине .....	3-108
<b>Слика 3-53</b> Приказ утицаја одлика обрадне геометрије на формирање путање и других одлика релативног кретања алата и обратка у захвату.....	3-109
<b>Слика 3-54</b> Три понуђена начина одређивања обрадне геометрије захвата 4-осног и 5-осног глодања по просторној кривој.....	3-112
<b>Слика 3-55</b> Сложена просторна крива која се може искористити као водиља за алат.....	3-112
<b>Слика 3-56</b> Крива водиља и две од безброј могућих оријентација смера осе алата .....	3-113
<b>Слика 3-57</b> Приказ одређивање обрадне геометрије за захват захвата 4-осног и 5-осног глодања по просторној кривој за варијанту када крива водиља „лежи” на, тј. припада граничној површини. ....	3-113
<b>Слика 3-58</b> Избор опције контроле смера осе алата дуж тачака криве водиље.....	3-114
<b>Слика 3-59</b> Избор смера алата одређује страну са које ће се вршити обрада.....	3-115
<b>Слика 3-60</b> Конструкције углова чеоног и бочног нагиба над тачкама криве водиље.....	3-116
<b>Слика 3-61</b> Углови бочног (а) и чеоног (б) нагиба у одговарајућим пројекцијама.....	3-116
<b>Слика 3-62</b> Приказ тачке са обода резног профила алата која се „води” по кривој водиљи. ....	3-117
<b>Слика 3-63</b> Неке од могућих опција за подешавање одлика контроле оријентације смера осе алата током кретања по кривој водиљи: (а) форсирана 4-осна обрада са могућношћу подешавања чеоног угла нагиба (б) интерполација по кривој водиљи са опсегом дозвољених вредности за угао бочног нагиба и (в) форсирање проласка осе алата кроз изабрану контролну тачку у простору.....	3-117
<b>Слика 3-64</b> Глодала са лоптастим врхом (полу-кружним) профилном.....	3-118
<b>Слика 3-65</b> Глодало с лоптастим резним врхом у захвату у коме је подешено да током вођења алата по кривој водиљи, оса алата буде нормална на одредишну, граничну, обрадну површину. ....	3-118
<b>Слика 3-66</b> Обимне брзине на ободној резној ивици профила глодала са лоптастим врхом чији је чеони нагиб подешен на -30°. ....	3-119
<b>Слика 3-67</b> Подешавање одлика провере недозвољеног задирања запремине алата у запремине издатка, стезног алата и додатног прибора за услове 5-осне обраде.....	3-119
<b>Слика 3-68</b> Подешавање вођења осе алата преко додатне криве водиље (криве водиље осе алата) као опције за случај израде латералног канала мастер модела калупа за вулканизацију аутомобилског пнеуматика.....	3-120

<b>Слика 3-69</b> Приказ три пролаза (у правцу осе) алата.....	3-121
<b>Слика 3-70</b> Оса алата у току захвата је „измештена” за 1 mm у односу на конструисану и изабрану криву водиљу осе алата. <i>CAPP/ CAM</i> апликација самостално опредељује страну измештања алата дуж криве водиље алата у зависности од референтне обрадне површине.....	3-121
<b>Слика 3-71</b> Приказ секвенци подешавања одлика обрадне геометрије и одлика контроле смера осе алата у варијанти захвата глодања бочне нагнуте површине.....	3-122
<b>Слика 3-72</b> Приказ формирања пролаза обраде у више пролаза у радијалном и аксијалном правцу.....	3-123
<b>Слика 3-73</b> Избор одредишне површине према којој ће се формирати релативног кретање алата и обратка.....	3-123
<b>Слика 3-74</b> Приказ корака у подешавању параметара 5-осног захвата глодања намењеног дубоким и стрмим сложеним површинама и цевима.....	3-124
<b>Слика 3-75</b> Приказ формирање путање алата за варијанту захвата: <i>Multi-Axis Tube Machining</i> . (а) избор опције вођења осе алата провлачењем осе кроз тачку, (б) избор просторне криве према којој ће се формирати равни за пролазе.....	3-124
<b>Слика 3-76</b> Подешавање одлика обрадне геометрије за захват грубог глодања <i>цера</i> .....	3-125
<b>Слика 3-77</b> Подешавање одлика релативног кретања алата и обратка: (а) подешавање општег облика (стила) путање и врсте глодања, (б) подешавање одлика радијалних пролаза и (в) аксијалних пролаза.....	3-126
<b>Слика 3-78</b> Подешавање одлика локалних делова путање док је алат у захвату, намењено обради коју одликује велика брзина резања, тзв. <i>high-speed machining</i> : (а) подешавање одлика локалних делова путање у угловима, (б) подешавање одлика локалних делова путање при прелазу из једног у други радијални пролаз.....	3-126
<b>Слика 3-79</b> Приказ путање алата у првом аксијалном пролазу (уклањање првог слоја материјала).....	3-127
<b>Слика 3-80</b> Приказ додавања готових делова путање помоћног кретања: (а) Избор врсте помоћног кретања, (б) Слагање сложених путања из више елементарних геометријских ентитета и подешавање одлика геометрије тих делова путање.....	3-128
<b>Слика 3-81</b> Подешавање вредности параметара геометрије путање и помака на сегментима путање помоћног кретања.....	3-129
<b>Слика 3-82</b> Приказ корака у моделирању путање помоћног кретања у <i>CAM</i> модулу <i>Cgeo PLM</i> .....	3-129
<b>Слика 3-83</b> Приказ подешавања одлика улазно и излазних путања у <i>CAM</i> модулу <i>SolidWorks PLM</i> .....	3-130
<b>Слика 3-84</b> Приказ путање алата у главном и помоћном кретању приликом анимације захвата „копања цера”.....	3-130
<b>Слика 3-85</b> Ортогонални погледи на путању алата у главном и помоћном кретању приликом анимације захвата „копања цера”.....	3-131
<b>Слика 3-86</b> Приказ путање алата главног и помоћног кретања алата у завршној обради нагнутих страна удубљења.....	3-131
<b>Слика 3-87</b> Приказ уноса вредности параметара који контролишу одлике обрадних пролаза укључујући и аксијалну и радијану дубину резања.....	3-132
<b>Слика 3-88</b> Приказ задавања технолошких параметара у <i>CAM</i> модулу <i>SolidWorks PLM</i> софтвера: (а) вредност помака за све сегменте путање алата, (б) вредности параметара технолошких одлика захвата се учитавају из базе података о препорукама технолошких одлика резања за дати материјал.....	3-133
<b>Слика 3-89</b> Подешавање технолошких одлика из уграђене библиотеке (базе података) препорука за комбинације дубине и брзине резања и помака спрам изабраног материјала обратка, материјала алата и врсте обраде. <i>CAM</i> модул <i>SolidWorks PLM</i> софтвера.....	3-134



<b>Слика 3-90</b> Приказ аутоматског уписа вредности помака (за радни ход и друге сегменте путање алата) и брзине резања из библиотеке препорука за дати алат и материјал обратка. <i>CAM</i> модул SolidWorks PLM софтвера.....	3-134
<b>Слика 3-91</b> Приказ подешавања технолошких одлика захвата на основу препоручених вредности режима резања за алат који је изабран за обављање захвата. <i>CAM</i> модул Catia PLM. ....	3-135
<b>Слика 3-92</b> Приказ започињања поступка вишеструког копирања два захвата (копање цепа и завршна обрада нагнутих страна цепа) транслаторним пресликавањем. ....	3-135
<b>Слика 3-93</b> Приказ поступка вишеструког копирања захвата у низу према транслаторном пресликавању у правцу једне -X осе.....	3-136
<b>Слика 3-94</b> Копирање захвата према афином пресликавању. ....	3-137
<b>Слика 3-95</b> Приказ утицаја избора тачке центра трансформације на примеру пресликавања путање алата <i>скалирањем</i> са истим фактором увећања путање 2. У примеру (а), за центар трансформације је изабран координатни почетак координатног система издатка. У случају (б) центар трансформације је тачка у пресеку дијагонала на подножној површини модела плоче.....	3-138
<b>Слика 3-96</b> Упоредни приказ изворне путање алата (а) и путања добијених пресликавањем трансформацијом скалирања, али са различитим центрима трансформације: (б) у $W_1 \equiv P_{CF}$ , и (в) у тачки у центру подножја издатка. ....	3-139
<b>Слика 3-97</b> Приказ пресликавања захвата чеоног глодања трансформацијом „оса-на-осу” са координатног система $W_1$ на $W_2$ .....	3-139
<b>Слика 3-98</b> Приказ корак у припреми вишеструког копирања скупа захвата транслаторним пресликавањем.....	3-140
<b>Слика 3-99</b> Приказ копираних путања алата целе операције глодања. ....	3-140
<b>Слика 3-100</b> Пресликавање путање са експлицитним захтевом за обрнутим смером обилажења алата око путање у односу на изворни захват. ....	3-141
<b>Слика 3-101</b> Приказ корака подешавања одлика новог координатног система уметнутог између два захвата у истој операцији.....	3-141
<b>Слика 3-102</b> Координате исте тачке $P_j$ на изратку изражене у односу на $W_1$ и $W_3$ .....	3-142
<b>Слика 3-103</b> Приказ извршног кода истог захвата у АРТ формату и разлике у координатама тачака путање алата: (а) када је $W_1$ важећи координатни систем и (б) када је $W_2$ важећи координатни систем.....	3-142
<b>Слика 3-104</b> Приказ равни у којима се формирају контуре и у којима се крећу затезачи електроде у облику жице.....	3-144
<b>Слика 3-105</b> Приказ компоненти производног склопа геометрије: (а) издатка, (б) секвенца формирања припремка и (в) уметања геометрије стезних клема.....	3-145
<b>Слика 3-106</b> Приказ секвенце избора машине и подешавања њених одлика.....	3-146
<b>Слика 3-107</b> Приказ подешавања одлика алата – електроде у облику жице. ....	3-146
<b>Слика 3-108</b> Приказ завршног подешавања одлика операције контурног сечења у <i>CAM</i> модулу Creo PLM софтвера.....	3-147
<b>Слика 3-109</b> Избор варијанти захвата контурног сечења електро-еродирањем материјала електродом у облику жице.....	3-147
<b>Слика 3-110</b> Подешавање одлика алата (електроде - жице) и одлике релативног кретања алата и обратка.....	3-148
<b>Слика 3-111</b> Приказ избора ивица издатка (изометријски поглед у пресеку) за граничне контуре сложене обрадне површине чије стране нису управне на XY раван. ....	3-149
<b>Слика 3-112</b> Избор координатног система захвата и тачака почетка и завршетка кретање електроде.....	3-149

<b>Слика 3-113</b> Симулација обиласка алата око референтне обрадне површине: (а) започињање првог пролаза, (б) други пролаз се одвија у супротном смеру. ....	3-150
<b>Слика 3-114</b> Одлике геометрије путање на локалним деловима помажу да се добију жељени профил исецања обратка. ....	3-151
<b>Слика 3-115</b> Приказ подешавања одлике помоћног (улазно-излазног) кретања код контурног сечења електро-еродирањем материјала електродом у облику жице. ....	3-151
<b>Слика 3-116</b> Приказ симулације уклањања материјала у захвату контурног сечења. ....	3-152
<b>Слика 3-117</b> Обрадни склоп код обраде стругањем. Израдак се налази унутар транспарентног припремка, који је стегнут у стезној глави са три стезне шапе. ....	3-153
<b>Слика 3-118</b> Обрадне контуре и координатни систем на нивоу издатка (а). Обрадна контура и раван са тачком на нивоу припремка (б). ....	3-153
<b>Слика 3-119</b> Дефинисање геометрије држача алата за спољашње уздужно и/или попречно стругање: а) Геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије држача у графичкој области, в) Дефинисање геометрије држача кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-155
<b>Слика 3-120</b> Дефинисање геометрије негативне изменљиве плочице алата за спољашње уздужно и/или попречно стругање: а) Дефинисање геометрије изменљиве плочице у графичкој области, б) Дефинисање геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података, в) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-156
<b>Слика 3-121</b> Положај резне ивице алата у односу на предмет обраде: а) Леви алат, б) Десни алат. Обратити пажњу на положај изменљиве плочице и смер обраћања главног вретена. ....	3-157
<b>Слика 3-122</b> Дефинисање геометрије држача алата за унутрашње уздужно стругање: а) Геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије држача у графичкој области, в) Дефинисање геометрије држача кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-157
<b>Слика 3-123</b> Дефинисање геометрије позитивне изменљиве плочице алата за унутрашње уздужно стругање: а) Дефинисање геометрије изменљиве плочице у графичкој области, б) Дефинисање геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података. ....	3-158
<b>Слика 3-124</b> Дефинисање геометрије држача алата за усецање спољашњег жлеба: а) Геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије држача у графичкој области, в) Дефинисање геометрије држача кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-159
<b>Слика 3-125</b> Дефинисање геометрије изменљиве плочице алата за усецање спољашњег жлеба: а) Дефинисање геометрије изменљиве плочице у графичкој области, б) Дефинисање геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података. ....	3-160
<b>Слика 3-126</b> Изменљиве плочице за усецање жлеба са различитим чеоним угловима. ....	3-160
<b>Слика 3-127</b> Дефинисање геометрије држача алата за усецање унутрашњег жлеба: а) Геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије држача у графичкој области, в) Дефинисање геометрије држача кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-161
<b>Слика 3-128</b> Дефинисање геометрије држача алата за израду спољашњег навоја: а) Геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије држача у графичкој области, в) Дефинисање геометрије држача кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-162
<b>Слика 3-129</b> Дефинисање геометрије изменљиве плочице алата за израду спољашњег навоја: а) Дефинисање геометрије изменљиве плочице у графичкој области, б) Дефинисање геометрије изменљиве плочице кроз унос или бирање података. ....	3-163

<b>Слика 3-130</b> Дефинисање геометрије држача алата за израду унутрашњег навоја: а) Геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије држача у графичкој области, в) Дефинисање геометрије држача кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-164
<b>Слика 3-131</b> Дефинисање геометрије једноделне завојне бургије: а) Поједностављен геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије завојне бургије у графичкој области, в) Дефинисање геометрије завојне бургије кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-164
<b>Слика 3-132</b> Дефинисање геометрије урезника: а) Поједностављен геометријски модел алата, б) Дефинисање геометрије урезника у графичкој области, в) Дефинисање геометрије урезника кроз унос или бирање података, г) Дефинисање компензације врха алата. ....	3-165
<b>Слика 3-133</b> Креирање операције обраде стругањем. ....	3-166
<b>Слика 3-134</b> Дефинисање координата тачке за измену алата. ....	3-166
<b>Слика 3-135</b> Дефинисање параметара хоризонталног нумерички управљаног струга. ....	3-167
<b>Слика 3-136</b> Типична конфигурација вертикалног нумерички управљаног струга (а). Типична конфигурација двоосног нумерички управљаног струга (б). ....	3-168
<b>Слика 3-137</b> Коришћење $X$ и $Z$ осе у комбинацији са $C$ осом: а) $C$ оса и хоризонтална оријентација погоњеног алата, за обраду на чеоној површини обратка, б) $C$ оса и вертикална оријентација погоњеног алата, за обраду на периферној површини обратка. ....	3-168
<b>Слика 3-138</b> Израда шестоугаоне форме помоћу погоњеног алата у софтверу <i>SinuTrain for SINUMERIK Operate</i> (а). Израда цилиндричног жлеба (б). ....	3-169
<b>Слика 3-139</b> Оријентација оса на стругу са $X$ , $Y$ , $Z$ и $C$ осом (а). Низ рупа на делу се може изградити на нумерички управљаном стругу који има само $C$ осу (б). Низ рупа на делу се може изградити на нумерички управљаном стругу који мора имати $Y$ осу (в). ....	3-169
<b>Слика 3-140</b> Стругарски центар са два вретена, два носача алата и осам програмабилних оса. ....	3-170
<b>Слика 3-141</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине. ....	3-171
<b>Слика 3-142</b> Ограничавање профила припремка или обратка помоћу линије: а) Почетни елемент профила припремка или обратка није дефинисан или је за параметар <i>Start limit mode</i> изабрана вредност <i>None</i> , б) За параметар <i>Start limit mode</i> је изабрана вредност <i>In</i> , в) За параметар <i>Start limit mode</i> је изабрана вредност <i>On</i> , г) За параметар <i>Start limit mode</i> је изабрана вредност <i>Out</i> . ....	3-172
<b>Слика 3-143</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине (а). Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине (б). ....	3-173
<b>Слика 3-144</b> Симулација путање центра врха алата за захват спољашњег попречног грубог стругања чеоне површине. ....	3-175
<b>Слика 3-145</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури. ....	3-175
<b>Слика 3-146</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (а). Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (б). ....	3-176

<b>Слика 3-147</b> Симулација путање центра врха алата за захват спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.....	3-177
<b>Слика 3-148</b> Дефинисање обрадне геометрије за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја (а) и уклањања заосталог материјала (б).....	3-177
<b>Слика 3-149</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала (горе) и начин креирања удубљења ( <i>Recessing mode</i> ) (доле) (а). Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захвате израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала (б).....	3-178
<b>Слика 3-150</b> Симулација путање центра врха алата за захвате: а) Израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја, б) Уклањања заосталог материјала.....	3-179
<b>Слика 3-151</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.....	3-180
<b>Слика 3-152</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (а). Начин кретања алата приликом обраде спољашњих углова (горе: под углом; доле: по кружном луку) (б).....	3-180
<b>Слика 3-153</b> Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (а). Празан ход по правој линији пре уласка алата у захват и празан ход по кружном луку при изласку алата из захвата (б).....	3-181
<b>Слика 3-154</b> Симулација путање центра врха алата за захват спољашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.....	3-182
<b>Слика 3-155</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват грубог усецања спољашњег жлеба.....	3-182
<b>Слика 3-156</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват грубог усецања спољашњег жлеба (а). Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват грубог усецања спољашњег жлеба (б).....	3-183
<b>Слика 3-157</b> Симулација путање центра врха алата за захват грубог усецања спољашњег жлеба.....	3-183
<b>Слика 3-158</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват финог усецања спољашњег жлеба.....	3-184
<b>Слика 3-159</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват финог усецања спољашњег жлеба.....	3-184
<b>Слика 3-160</b> Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват финог усецања спољашњег жлеба (а). Значење термина <i>Other flank</i> (остали бокови) (горе) и значење вредности параметара <i>Clearance</i> и <i>Overlap</i> приликом обраде дна жлеба (доле) (б).....	3-185
<b>Слика 3-161</b> Симулација путање центра врха алата за захват финог усецања спољашњег жлеба.....	3-186
<b>Слика 3-162</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват израде спољашњег навоја.....	3-186
<b>Слика 3-163</b> Дефинисање профила, корака и броја почетака навоја (а). Дефинисање параметара стратегије обраде за захват израде спољашњег навоја (горе) и врсте обраде по питању дубине резања по пролазима и начини уласка алата (доле) (б).....	3-187
<b>Слика 3-164</b> Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват израде спољашњег навоја.....	3-188
<b>Слика 3-165</b> Симулација путање центра врха алата за захват израде спољашњег навоја.....	3-188

<b>Слика 3-166</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват бушења рупе.....	3-189
<b>Слика 3-167</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват бушења рупе.....	3-189
<b>Слика 3-168</b> Симулација путање центра врха алата за захват бушења рупе.....	3-190
<b>Слика 3-169</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.....	3-190
<b>Слика 3-170</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (а). Дефинисање параметара који се одnose на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури (б). .....	3-191
<b>Слика 3-171</b> Симулација путање центра врха алата за захват унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.....	3-191
<b>Слика 3-172</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.....	3-192
<b>Слика 3-173</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (а). Дефинисање параметара који се одnose на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури (б). .....	3-192
<b>Слика 3-174</b> Симулација путање центра врха алата за захват унутрашњег уздужног финог стругања по сложеној контури.....	3-193
<b>Слика 3-175</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват одсецања.....	3-193
<b>Слика 3-176</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват одсецања (а). Дефинисање параметара који се односе на празан ход пре уласка алата у захват са обратком и празан ход при изласку алата из захвата са обратком за захват одсецања (б). .....	3-194
<b>Слика 3-177</b> Симулација путање центра врха алата за захват одсецања .....	3-194
<b>Слика 3-178</b> Видео симулација комплетног производног програма.....	3-195
<b>Слика 3-179</b> Дефинисање директног прилазног (а) и директног излазног (б) кретања код захвата спољашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури. ....	3-197
<b>Слика 3-180</b> Дефинисање прилазног ( <i>Radial axial</i> ) (а) и излазног ( <i>Axial radial</i> ) (б) кретања код захвата унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури.....	3-198
<b>Слика 3-181</b> Дефинисање режима приликом дефинисања изменљиве плочице (а). Дефинисање режима приликом дефинисања алата (завојне бургије) (б). .....	3-199
<b>Слика 3-182</b> Процедура дефинисања параметара обраде за захвате спољашњег попречног и уздужног грубог стругања, израде спољашњег жлеба за излаз ножа за резање навоја и уклањања заосталог материјала и унутрашњег уздужног грубог стругања (а). Процедура дефинисања параметара обраде за захвате спољашњег и унутрашњег уздужног финог стругања (б). .....	3-200
<b>Слика 3-183</b> Процедура дефинисања параметара обраде за захвате грубог усецања спољашњег жлеба и одсецања (а). Процедура дефинисања параметара обраде за захват финог усецања спољашњег жлеба (б). .....	3-201
<b>Слика 3-184</b> Процедура дефинисања параметара обраде за захват израде спољашњег навоја (а). Процедура дефинисања параметара обраде за захват бушења рупе (б). .....	3-202
<b>Слика 3-185</b> Дефинисање додатних технолошких параметара приликом дефинисања: а) Изменљиве плочице, б) Алата (једноделне завојне бургије). .....	3-203
<b>Слика 3-186</b> Дефинисање додатних технолошких параметара приликом дефинисања држача алата за: а) Одсецање, б) Унутрашње уздужно стругање.....	3-204

<b>Слика 3-187</b> Креирање низа производних техничких елемената: а) Почетак процедуре, б) Бирање низа геометријских техничких елемената.....	3-204
<b>Слика 3-188</b> Креирање новог низа производних техничких елемената (ротациони низ рупа на чеаној површини) (а). Бирање одговарајућег низа геометријских техничких елемената у стаблу модела (б).....	3-205
<b>Слика 3-189</b> Дефинисање обрадне геометрије за захват бушења ротационог низа рупа на чеаној површини.....	3-206
<b>Слика 3-190</b> Дефинисање параметара стратегије обраде за захват бушења ротационог низа рупа на чеаној површини.....	3-206
<b>Слика 3-191</b> Симулација путање центра врха алата за захват бушења ротационог низа рупа на чеаној површини.....	3-207
<b>Слика 3-192</b> Обрада на нумерички управљаном стругу који има два носача алата (један је испред осе обратка (унутрашња обрада), а други је иза осе обратка (спољашња обрада)) и једно вретено.....	3-207
<b>Слика 3-193</b> Обрада на нумерички управљаном стругу који има два вретена и један носач алата: а) Обрада у првом стезању, б) Аутоматско стезање обратка у стезној глави секундарног вретена, в) Обрада у другом стезању.....	3-208
<b>Слика 3-194</b> Обрада на нумерички управљаном стругу који има два вретена и два носача алата.....	3-209
<b>Слика 3-195</b> Геометријски модел издатка који ће бити коришћен као пример приликом моделирања групних захвата обраде.....	3-209
<b>Слика 3-196</b> Обрадне контуре и координатни системи на нивоу издатка (а). Обрадна контура, раван и тачке на нивоу припремка (б).....	3-211
<b>Слика 3-197</b> Обрадни склоп код моделирања групних захвата обраде на нумерички управљаном стругу са једним вретеном и два носача алата.....	3-211
<b>Слика 3-198</b> Дефинисање параметара нумерички управљаног струга са једним вретеном и два носача алата. Дефинисање параметара за главно вретено.....	3-212
<b>Слика 3-199</b> Дефинисање параметара: а) Горњег носача алата, б) Доњег носача алата.....	3-212
<b>Слика 3-200</b> Аутоматско креирање производног програма за горњи носач алата (а). Креирани захвати који ће се реализовати алатима са горњег носача алата (б).....	3-213
<b>Слика 3-201</b> Креирање производног програма за доњи носач алата (а). Креирани захвати који ће се реализовати алатима са доњег носача алата (грана <i>Manufacturing Program.2</i> ) (б).....	3-213
<b>Слика 3-202</b> Дефинисање прилазног ( <i>Radial axial</i> ) кретања код захвата унутрашњег уздужног грубог стругања по сложеној контури, који се реализује алатом са доњег носача алата.....	3-214
<b>Слика 3-203</b> <i>Gantt</i> -ов дијаграм непосредно после креирања захвата.....	3-214
<b>Слика 3-204</b> Синхронизације захвата.....	3-215
<b>Слика 3-205</b> <i>Gantt</i> -ов дијаграм након извршених синхронизација захвата.....	3-216
<b>Слика 3-206</b> Анимација уклањања материјала при групном захвату.....	3-216
<b>Слика 3-207</b> Анимација релативног кретања алата и обратка у захвату: (а) приказ детаља путање алата, (б) приказ уклањања материјала.....	3-217
<b>Слика 3-208</b> Симулација глодања у <i>CAE Ansys</i> софтверу (експлицитна динамичка анализа).....	3-218
<b>Слика 3-209</b> Приказ резултата „срачунавања” геометријских места путање алата и запремине коју алат заузима обилазећи путању алата на начин који је моделиран.....	3-219
<b>Слика 3-210</b> Приказ детаља анимације релативног кретања алата и обратка у захвату ( <i>CAM</i> модул <i>Solid Works PLM</i> софтвера).....	3-220
<b>Слика 3-211</b> Приказ детаља анимације релативног кретања алата и обратка у захвату ( <i>CAM</i> модул <i>Catia PLM</i> софтвера).....	3-220
<b>Слика 3-212</b> Приказ прегледа и измене технолошких одлика на деловима путање.....	3-221

<b>Слика 3-213</b> Задавање пост-процесорских инструкција у изабраној тачки са генерисане путање алата.....	3-221
<b>Слика 3-214</b> Изглед и запремина обратка након низа захвата обраде.....	3-222
<b>Слика 3-215</b> Приказ анализе одступања облика обратка у одређеној фази обраде у односу на моделирану геометрију изратка.....	3-223
<b>Слика 3-216</b> Приказ спровођења виртуелних мерења појединих детаља (радијуса лука на обратку) на моделу у одређеној фази обраде.....	3-223
<b>Слика 3-217</b> Приказ утврђивања колизије алата и обратка приликом анимације резања материјала: (а) <i>CAM Catia PLM</i> , (б) <i>CAM SolidWorks PLM</i> .....	3-224
<b>Слика 3-218</b> Задавање одлика кинематског склопа (механизма) НУ машине: приказ подешавања дозвољеног релативног кретања модела радног стола и модела постоља у правцу X осе.....	3-224
<b>Слика 3-219</b> Покретање симулације рада машине, односно анимације кретања њених компоненти, алата, стезног прибора и обратка коришћењем низа путања алата у операцији ( <i>CAM</i> модул <i>Catia PLM</i> ).....	3-224
<b>Слика 3-220</b> Детаљи из симулације рада машине и анимације комплетне операције глодања низа делова на хоризонталној глодалици.....	3-224
<b>Слика 3-221</b> Приказ трајног записивања извршног програма у АРТ формату: (а) <i>CAM</i> модул <i>SolidWorks</i> и (б) <i>CAM</i> модул <i>Creo</i> .....	3-224
<b>Слика 3-222</b> Приказ поступка стварања и трајног записивања извршног програма моделиране операције (а) уз додатна подешавања начина исписивања појединих детаља програма (б).....	3-224
<b>Слика 3-223</b> Подешавање одлика нумеричке контроле машине и избор постпроцесора као део поступка подешавања одлика машине. (а) <i>CAM</i> модул <i>Catia</i> , (б) <i>CAM</i> модул <i>Creo</i> , (в) <i>CAM</i> модул <i>SolidWorks</i> .....	3-224
<b>Слика 3-224</b> Приказ подешавања путање до збирке постпроцесора у <i>CAM</i> модулу <i>Catia PLM</i> софтвера.....	3-224
<b>Слика 3-225</b> Низ корака превођења од дигиталног модела операције до кретања извршних органа НУМА.....	3-224
<b>Слика 3-226</b> Приказ покретања превођења записа моделиране операције у извршни G-код ( <i>CAM</i> модул <i>Catia PLM</i> софтвер).....	3-224
<b>Слика 3-227</b> Приказ покретања превођења записа моделиране операције у извршни G-код ( <i>CAM</i> модул <i>SolidWorks PLM</i> софтвер).....	3-224
<b>Слика 3-228</b> Приказ покретања превођења записа моделиране операције контурног сечења у извршни G-код ( <i>CAM</i> модул <i>Creo PLM</i> софтвер).....	3-224
<b>Слика 3-229</b> Откривање грешака у превођења у току самог постпроцесирања АРТ датотеке.....	3-224
<b>Слика 3-230</b> Пријаве упозорења од стране постпроцесора у току превођења.....	3-224
<b>Слика 3-231</b> Подешавање одлика машине и управљачке јединице које ће бити коришћене у емуляцији програмираних захвата обраде.....	3-224
<b>Слика 3-232</b> Приказ осиромашене верификације G-кода који је генерисан управо за подешену машину (DMU50) и одговарајућу управљачку јединицу (Heidenhain) у <i>Catia</i> помоћу генеричког <i>I CAM</i> постпроцесора.....	3-224
<b>Слика 3-233</b> Приказ разлике у путањи алата која је добијена интерпретацијом дела извршног програма датог у АРТ формату (а) и истог тог дела путање интерпретираног на основу G-кода (б).....	3-224
<b>Слика 3-234</b> Постпроцесор не препознаје инструкцију из извршног програма записаног у АРТ формату.....	3-224
<b>Слика 3-235</b> „Позивање” алата за израду тзв. дигиталне операционе листе у табеларној форми.....	3-224



<b>Слика 3-236</b> Приказ операционе листе са детаљима сваког захвата укључујући и главни и укупна времена трајања захвата. ....	3-224
<b>Слика 3-237</b> Покретање поступка израде технолошке документације у форми колекције HTML страница.....	3-224
<b>Слика 3-238</b> Приказ дела формиране технолошке документације са детаљима захвата у колекцији повезаних HTML страница. ....	3-224
<b>Слика 4-1</b> Подешавање припремка и делова који ће произићи из операције просецања пластичном деформацијом и контурног исецања ласером.....	4-224
<b>Слика 4-2</b> Корак у коме се дефинишу врсте захвата потребни за просецање и пробијање облика на припремку. <sup>1</sup> .....	4-224
<b>Слика 4-3</b> Подешавање одлика алата за сваки захват.....	4-224
<b>Слика 4-4</b> Избор контура за просецање и симулација обављања захвата. ....	4-224
<b>Слика 4-5</b> Алат за пробијање отвора и распоред израдака на траци (припремку).....	4-224
<b>Слика 4-6</b> Алат за пробијање и просецање отвора. ....	4-224
<b>Слика 4-7</b> Сложенији алат за пробијање и просецање плочице са отворима. ....	4-224
<b>Слика 4-8</b> Алат за бочно пробијање отвора извученог дела. ....	4-224
<b>Слика 4-9</b> Алата за пробијање отвора на дну извученог дела. ....	4-224
<b>Слика 4-10</b> Два конструктивна решења пробијачица.....	4-224
<b>Слика 4-11</b> Парови алата на пробијачицама.....	4-224
<b>Слика 4-12</b> Неке од операција на пробијачици. ....	4-224
<b>Слика 4-13</b> Параметри за софтверско дефинисање фактора еластичног исправљања.....	4-224
<b>Слика 4-14</b> Параметри које треба укључити у моделирање операција савијања. ....	4-224
<b>Слика 4-15</b> Подешавање геометријских параметара алата на преси за савијање у одговарајућој CAM апликацији.....	4-224
<b>Слика 4-16</b> Модел савијеног дела и њихова развијена дужина након пробијања и просецања. ....	4-224
<b>Слика 4-17</b> Приказ етапа моделирања операције савијања: (а) листа потребних алата са свим релевантним геометријским одликама и (б) модел издатка након примењених предложених захвата савијања. ....	4-224
<b>Слика 4-18</b> Свијање на <i>обкант</i> преси у два различита алата.....	4-224
<b>Слика 4-19</b> Приказ симулације обављања сложене операције која укључује захвате пробијања, просецања и савијања у тзв. комбинованом алату. ....	4-224
<b>Слика 4-20</b> Модел пробијања и просецања са савијањем у комбинованом алату.....	4-224
<b>Слика 4-21</b> Спајање лимова деформабилним елементима.....	4-224
<b>Слика 4-22</b> Поступци савијања у циљу спајања лимова и анализа деформација споја.....	4-224
<b>Слика 4-23</b> Спајање лимова сегментним савијањем крајева.....	4-224
<b>Слика 4-24</b> Спајање лимова по крајевима профилним ваљцима.....	4-224
<b>Слика 4-25</b> Модел алата и обратка у неколико фаза поступка спајања цеви наборима по обиму.....	4-224
<b>Слика 4-26</b> Оптимизација модела припремка кутијастог (а) и сложеног дела (б). ....	4-224
<b>Слика 4-27</b> Оптимизација модела припремка кутијастог дела. ....	4-224
<b>Слика 4-28</b> Технологија добијања дела у 8 технолошких операција.....	4-224
<b>Слика 4-29</b> Прогресивни алати са припремком облика траке. ....	4-224
<b>Слика 4-30</b> Модел за степенести део. ....	4-224
<b>Слика 4-31</b> модел извлачења дубљег и плићег конусног дела. ....	4-224
<b>Слика 4-32</b> Спољашњи изглед и изглед дела у пресеку.....	4-224

<b>Слика 4-33</b> Приказ секвенци из симулације технолошког поступка дубоког извлачења са стањењем дебљине зида .....	4-224
<b>Слика 4-34</b> Алат и половина готовог дела издувног система код аутомобила. ....	4-224
<b>Слика 4-35</b> Анализа критичних степена деформације делова шасије аутомобила. ....	4-224
<b>Слика 4-36</b> Модел технологије дубоког извлачења несиметричног дела. ....	4-224
<b>Слика 4-37</b> Модел дубоког извлачења са кочећим ребрима и дистанцерима .....	4-224
<b>Слика 4-38</b> Кочећи дистанцери или одстојници. ....	4-224
<b>Слика 4-39</b> Горњи делови алата за дубоко извлачење позиција шасије аутомобила. ....	4-224
<b>Слика 4-40</b> Алат великих габарита за дубоко извлачење на преси. ....	4-224
<b>Слика 4-41</b> CAD/CAM модел делова шасије бочне стране аутомобила. ....	4-224
<b>Слика 4-42</b> CAPP модел кројених лимова за шасију аутомобила. ....	4-224
<b>Слика 4-43</b> Модел В стуба аутомобила и алата. ....	4-224
<b>Слика 4-44</b> Елементи добијени финим пробијањем и просецањем.....	4-224
<b>Слика 4-45</b> Модел операције финог просецања у алату из тракастог припремка.....	4-224
<b>Слика 4-46</b> НУ преса за фино пробијање (а), модел алата и операције финог пробијања (б) и део добијен у процесу финог пробијања и утискивања (в). ....	4-224
<b>Слика 4-47</b> Коленасто вратило као врхунски производ топлог ковања. ....	4-224
<b>Слика 4-48</b> Приказ промене облика отковка након захвата ковања као и симулација линија течења материјала у процесу топлог ковања коленастог вратила (QForm CAE/CAM софтвер).....	4-224
<b>Слика 4-49</b> Пластичне деформације и линије течења са променом деформационе силе (Transvalor FORGE3).....	4-224
<b>Слика 4-50</b> Приказ промене облика обратка током процеса ковања.....	4-224
<b>Слика 4-51</b> Приказ симулације стања структуре и облика отковка током спровођења технолошког поступка топлог ковања коленастог вратила .....	4-224
<b>Слика 4-52</b> Приказ секвенце симулације топлог ковања закривљених полууга .....	4-224
<b>Слика 4-53</b> Приказ промене облика отковка у сукцесивним захватима топлог ковања.....	4-224
<b>Слика 4-54</b> Приказ симулације операције топлог ковања у затвореном алату. ....	4-224
<b>Слика 4-55</b> Приказ ротационог уздужног ковања (QForm CAE/CAM софтвер). ....	4-224
<b>Слика 4-56</b> Ротационо попречно ковање (QForm CAE/CAM софтвер). ....	4-224
<b>Слика 4-57</b> Приказ нумеричке симулације операције радијалног ковања спољашњег озубљења на вратило у CAE/CAM софтверу QForm. ....	4-224
<b>Слика 4-58</b> Приказ симулације операције хладног ковања у алату са праћењем унутрашњих напона, деформација и температуре у компонентама алата и изгледа готових делова добијени овим технолошким поступком. ....	4-224
<b>Слика 4-59</b> Симулација геометрије обратка по обављеним захватима хладног ковања у QForm CAE/CAM софтверу. ....	4-224
<b>Слика 4-60</b> Предобликовање и друга технолошка операција ковања.....	4-224
<b>Слика 4-61</b> Трећа технолошка операција са променом деформационе силе.....	4-224
<b>Слика 4-62</b> Четврта технолошка операција и промена деформационе силе.....	4-224
<b>Слика 4-63</b> Пета технолошка операција. ....	4-224
<b>Слика 4-64</b> Приказ модела операције хладног ковања тела и главе вијка поређаних по сукцесивним захватима (секвенцама).....	4-224
<b>Слика 4-65</b> Приказ линије за израду тела и главе вијка хладним ковањем. ....	4-224
<b>Слика 4-66</b> Приказ технологије хладног ковања.....	4-224
<b>Слика 5-1</b> Кораци адитивног производног процеса. ....	5-224
<b>Слика 5-2</b> Поступак моделирања FFF/ FDM процеса адитивне производње.....	5-224

Слика 5-3 Примери интерфејса (а) Simplify 3D, (б) UltiMaker Cura и (в) PrusaSlicer софтвера.....	5-224
Слика 5-4 Пример картице за подешавања параметара штампача у Ultimaker Cura софтверу.....	5-224
Слика 5-5 Неке од функција манипулације моделом у различитим софтверима.....	5-224
Слика 5-6 Подешавања везана за слојеве у Simplify 3D, Ultimaker Cura и PrusaSlicer софтверу.....	5-224
Слика 5-7 Различит број слојева у љусци.....	5-224
Слика 5-8 Картице за подешавање одлика љуски у различитим софтверима.....	5-224
Слика 5-9 Приказ подешавања густине испуне.....	5-224
Слика 5-10 Приказ избора стила дезена (или шаре или шрафуре) испуне.....	5-224
Слика 5-11 Приказ различитих процената испуне 5%, 20%, 40%, 70%.....	5-224
Слика 5-12 Различити дезени испуне код Cura софтвера.....	5-224
Слика 5-13 Примери различито дефинисаних носећих структура за исти део у две различите <i>CAPP/CAM</i> апликације.....	5-224
Слика 5-14 Приказ картице са опцијама за подешавања одлика носеће структуре.....	5-224
Слика 5-15 Картице за подешавање помоћних структура.....	5-224
Слика 5-16 Приказ <i>Raft</i> подлоге (у виду сплава).....	5-224
Слика 5-17 Приказ <i>Brim</i> подлоге.....	5-224
Слика 5-18 Приказ <i>Skirt</i> подлоге.....	5-224
Слика 5-19 Приказ анимације израде делова на 3D штампачу.....	5-224
Слика 5-20 Приказ картице са опцијама за подешавање одлика екструдера.....	5-224
Слика 5-21 Картице подешавања материјала у PrusaSlicer и Ultimaker Cura софтверу.....	5-224
Слика 6-1 Стереоскопија и одређивање координата пројектоване тачке.....	6-224
Слика 6-2 Методе за аквизицију података са физичких објеката.....	6-224
Слика 6-3 Оптичке методе аквизиција података.....	6-224
Слика 6-4 Конструктивна извођења картезијанских СММ-а.....	6-224
Слика 6-5 СММ са хоризонталном руком.....	6-224
Слика 6-6 СММ са зглобном руком (преузето са <a href="https://industry.nikon.com/en-gb/">https://industry.nikon.com/en-gb/</a> ).....	6-224
Слика 6-7 Стона СММ са објектом чија геометрија се утврђује у мерном простору машине (а) и приказ пипка/сонде у операцији утврђивања геометрије предмета (б).....	6-224
Слика 6-8 Скенирани модел објекта (предмета за мерење) са горње стране (а) и са доње стране (б).....	6-224
Слика 6-9 Приказ дигиталног модела геометрије објекта који је мерен (а) након формирања мозаичке мреже тетраедарских елементарних површина и (б) након „оздрављења“ геометрије мозаичког модела.....	6-224
Слика 6-10 Приказ секвенце формирања ободних кривих површинског модела над тачкама привремених конструкционих кривих.....	6-224
Слика 6-11 Формирање површине на основу кривих (а) и приказ измоделиране доње површине објекта који је скениран у поступку реверзног моделирања (б).....	6-224
Слика 6-12 Приказ склопа доње и горње површине, поглед с горње стране (а) и поглед с доње стране (б).....	6-224
Слика 6-13 Општи алгоритам моделирања захвата мерења.....	6-224
Слика 6-14 Приказ спремљених варијанти захвата мерења геометрије у <i>CAM</i> модулима SolidWorks, Creo и Catia софтвера.....	6-224
Слика 6-15 Избор површине која се мери.....	6-224
Слика 6-16 Мерне сонде са тзв. <i>Stylus</i> врхом (куглицом). (а) мерна сонда са адаптером за стезање на глодалици и (б) контрола геометрије обратка након стезања у стезну главу струга.....	6-224

<b>Слика 6-17</b> Подешавање одлика мерне сонде.....	6-224
<b>Слика 6-18</b> Подешавање одлика путање сонде .....	6-224
<b>Слика 6-19</b> Приказ секвенце у којој се задају вредност помака и дефинишу параметри улазно-излазних кретања.....	6-224
<b>Слика 6-20</b> Приказ „уласка” <i>Stylus</i> врха сонде у материјал: моделирано је да се сонда заустави када оса сонде пређе циљану површину 1mm. Заправо, у пракси, доћи ће до савијања врата сонде.....	6-224
<b>Слика 6-21</b> Део извршног програм у АРТ формату који се односи на мерење геометрије.....	6-224
<b>Слика 7-1</b> Схема директне нумеричке контроле и могући комуникациони канали.....	7-224
<b>Слика 7-2</b> Приказ шеме DB 9S и DB 25S конектора (а) који омогућавају серијску комуникацију RS232 између рачунара и НУ машине и кабла са та два конектора (б) .....	7-224
<b>Слика 7-3</b> DNC Терминал за комуникацију са DNC сервера према НУ машинама кроз RS 232 комуникацијски протокол.....	7-224
<b>Слика 8-1</b> Приказ визуелног и хаптичког поља човека.....	8-224
<b>Слика 8-2</b> Приказ увежбавања ВИ која руководи роботом да препозна припремак на стезном прибору и да према њему обави операције спајања (заваривањем). (преузето са видео записа NX Siemens и Nvidia индустријски метаверсум <a href="https://www.youtube.com/watch?v=w_yX_lh1fgE">https://www.youtube.com/watch?v=w_yX_lh1fgE</a> ).....	8-224
<b>Слика 8-3</b> Приказ аутоматског препознавања обрадне геометрије и семантичке категоризације делова геометрије издатка у контексту моделирања операција обраде у CAM модулу SolidWorks PLM софтвера.....	8-224
<b>Слика 8-4</b> CAM модул самостално препознаје и моделира захвате обраде који се могу применити и при томе самостално бира алате, и режиме обраде.....	8-224
<b>Слика 8-5</b> Приказ коришћења аналогича топологија семантичких мрежа којима се описују и препознају геометријске одлике обрадних површина, а са циљем доношења одлуке о избору врсте захвата који треба применити.....	8-224
<b>Слика 8-6</b> Приказ уноса логичног израза (правила) за доделу вредности помака на делу путање када алат улази у захват у зависности од изабраног стила путање главног кретања.....	8-224
<b>Слика 8-7</b> Приказ уноса логичног израза (експертског правила) за доделу вредности параметра који контролише нагиб алата приликом уласка у захват на основу услова – каква се радијална компензација алата користи.....	8-224
<b>Слика 8-8</b> Приказ скоро потпуног поклапања виртуелног објекта са реалним објектом у простору: (а) поглед на објекат кроз дисплеј таблета и (б) приказ унутрашњости склопа.....	8-224
<b>Слика 8-9</b> Приказ секвенце формирања дигиталног окружења за виртуелизацију на визир проширене стварности. На делу слике (а) је снимак лабораторије, а на делу слике (б) је изграђени дигитални садржај истог окружења.....	8-224
<b>Слика 8-10</b> Типови визуелних приказивача: (а) видео-, (б) оптичко-прозрачни, (в) пројективни.....	8-224
<b>Слика 8-11</b> Начини праћења у AR системима зависно од типа сензора.....	8-224
<b>Слика 8-12</b> Уметање објекта у визуелно-хаптичко поље корисника на основу маркера у виду QR кода.....	8-224
<b>Слика 8-13</b> Моделирање сцене које су повезане са одређеним захватима из упутства о монтажи.....	8-224
<b>Слика 8-14</b> Симулација AR садржаја кроз визир.....	8-224
<b>Слика 8-15</b> Приказ виртуелног садржаја (објекта – високо-напонска спојница) у операцији инсталације/монтаже.....	8-224

<b>Слика 8-16</b> Приказ секвенце инструкције за рад са НУ машином коју корисник добије преко <i>AR</i> визира (а); упозорење које <i>AR</i> уређај пружа оператеру спрам његове позиције у односу на НУ машину (б).....	8-224
<b>Слика 8-17</b> Приказ секвенце навођења заваривача на позиције које треба заварити помоћу пројектора и приказивача <i>AR</i> технологије.....	8-224
<b>Слика 8-18</b> Примери усмеравања пажње корисника на одговарајући елемент на производу, помоћу пројектора у складу са листом инструкција на визиру.....	8-224
<b>Слика 8-19</b> Приказ пружања техничке подршке у одржавању опреме даљински путем припреме модела технолошке операције за <i>AR</i> дисплеј (у овом случају то је таблет рачунар).....	8-224
<b>Слика 8-20</b> Процес прикупљања садржаја уз помоћ <i>Vuforia Expert Capture</i> (а); процес обрађивања садржаја приказан на слици (б); коришћење створене <i>AR</i> инструкције од стране невештог радника (в).....	8-224

## Списак табела

<b>Табела 2-1</b> CAD/CAM/CAE софтвер и одговарајућа геометријска језгра.....	2-46
<b>Табела 5-1</b> Произвођачи НУМАП, адитивне технологије и системски и компатибилни CAPP/CAM софтвери.....	5-224
<b>Табела 5-2</b> Најчешће коришћени софтвери за планирање процеса адитивне производње код FFF/FDM штампача.....	5-224
<b>Табела 5-3</b> Најчешће коришћени софтвери за моделирање процеса адитивне производње на бази полиимеризације течних смола.....	5-224
<b>Табела 6-1</b> Подаци о машини Roland MDX-20 .....	6-224
<b>Табела 6-2</b> Подаци о машини везани за могућности скенирања.....	6-224

## Списак одредница

- 3D Printing, 5-287
- 3D Slicer, 5-291
- 3D штампање
  - 3D штампа, 5-287
- 3Д Скенирање, 6-327
- add-in*-ови
  - Додатни модули, 3-218
- Additive manufacturing, 5-287
- Advanced Production Scheduling*
  - APS*, 1-12
- APT, 2-52
- AR
  - Augmented reality, 8-371, 8-372, 8-378, 8-379, 8-380, 8-381, 8-382, 8-383, 8-384, 8-385, 8-386, 8-387, 8-388, 8-389, 8-390, 8-391, 9-410
- ASCII*, 2-43
- Augmented Reality
  - AR, 8-371
- Aural*, 8-381
- Bar feeder, 3-208
- CAD feature, 3-92, 3-97, 3-99, 3-135, 3-136, 9-397
- CAM feature, 2-54, 3-136
- CAM верификатори, 2-57, 3-233
- CAPP/CAM* апликација, 1-12
- CAX*, 2-45, 2-46, 2-47, 2-48, 6-340, 8-370, 9-394
- Cloud for DNC, 7-363
- CMM, 2-27, 6-329, 6-332, 6-333, 6-334, 6-335, 6-336, 6-337, 6-338, 6-339, 6-340, 6-341, 6-345, 6-351, 9-408
- CNC, 2-44
- CNC machine tool commissioning, 3-230
- COM сервер, 7-362
- Computer Aided Manufacturing*
  - CAM*, 1-9
- Computer Aided Process Planning*
  - CAPP*, 1-7
- Computer Integrated Manufacturing
  - CIM, 7-359
- Computer to Machine – C2M, 7-356
- Crankshaft, 4-272
- Cutting edge angle, 3-155
- Datum* елемент, 3-75
- DB 25S, 7-360
- DB 9S, 7-360
- Debug*-ирање, 3-232
- Deep drawing, 4-258
- Digital Manufacturing*, 8-369
- Digital prototyping, 6-325
- DIN стандард 66025, 2-52
- Direct Numerical Control
  - DNC, v, 7-355
- Display, 8-380
- Drain hole placing, 5-296
- DXF*, 2-47
- Enterprise Resource Planning*
  - ERP*, 1-12
- Ethernet комуникација, 7-360
- EXAPT, 2-53
- Експертска правила, 8-376
- Експертски системи, 8-375
- FDM, 5-293
- Feature extraction, 2-37, 2-38, 3-97
- Feature recognition, 2-37, 2-38, 3-97
- Feature refinement, 2-38
- FFF, 5-293
- Finite Element Method*
  - FEM, 4-246
- Fixture, 7-79
- Folding, 4-255
- From Point, 3-75
- FTP протокол, 7-360
- Gantt-ов дијаграм, 3-214
- GPS, 8-384
- Gustatory*, 8-381
- G-kôd*, 2-52
- Hand style, 3-155
- Hand-held*, 8-382
- Haptic*, 8-381
- Helix, 3-127
- Hemming, 4-256



- High speed machining, 3-125
- HMD, 8-382
- HMPD, 8-382
- Home Point, 3-70, 3-75
- IGES, 2-47
- inside-out, 8-384
- Internet of Things
  - IoT, 2-42, 8-392
- ISO 6983, 2-52
- Језгро геометријских моделера, 2-45
- Крива водиља осе алата, 3-120
- LAN, 7-356
- Live tool, 3-168
- Machine to Machine – M2M, 7-356
- Manufacturing Data Acquisition
  - MDA, 7-361
- Manufacturing Execution System
  - MES, 7-364
- Maximal Permissible Error
  - MPE, 6-335
- Mixed Reality
  - MR, 8-371
- mqtt, 7-365
- MTConnect Standard, 7-365
- Multi-Axis Flank Contouring, 3-122
- Multi-Axis Tube Machining, 3-124
- NC sequence, 3-86
- Netbeui, 7-360
- Netbios, 7-360
- NFS, 7-360
- Olfactory, 8-381
- OPC UA, 2-53, 7-365
- Opposite Hand Machining, 3-140
- Optical see-through, 8-381
- outside-in, 8-384
- Outward helical, 3-126
- Part hollowing, 5-296
- PDM, 3-66
- PLC, 7-362
- Probe cycles, 6-346
- Probe tool
  - мерна сонда, 6-347
- Process Control Systems, 2-18
- Process table, 3-237
- Product Lifecycle Management
  - PLM, 1-12
- Production Data Acquisition
  - PDA, 7-361
- Production Planning and Scheduling
  - PPS, 1-12
- Production Scheduling and Resource Planning
  - PSRP, 1-12
- Ramping, 3-127
- Rapid Prototyping, 5-287
- Read in режим рада, 7-360
- Reference machining axis system, 3-154
- RepRap штампач, 5-288
- Retract plane, 3-76
- Reverse\_Dist, 3-150
- RS-274, 2-52
- SaaS, 8-371
- Sheetmetal part design, 4-243, 4-253
- Sheetmetal processing, 4-254
- Shell/perimeter, 5-304
- Single Minute Exchange of Die
  - SMED операција, 4-267
- Slicing, 5-310
- Software-as-a-Service
  - SaaS, 8-370
- STEP, 2-47
- STEP-NC, 2-53
- STL, 2-47
- Stylus врх, 6-347
- TCP/IP, 7-363
- Tool change point
  - TCP, 3-70, 3-166
- Tool tip, 3-105
- Toolpath calculation, 3-219
- Toolpath generation, 3-219
- Tracker, 8-380
- VDI 3424, 7-355
- Video see-through, 8-381
- Virtual Reality
  - VR, 8-371
- VRD
  - Virtual retinal display, 8-382
- Wire Electric Discharge Machining - Wire EDM, 3-144
- WLAN, 7-362
- Approach feedrate, 3-106
- Абкант преса, 4-254
- Адитивна производња
  - АП, 5-287
- Аксијални пролаз, 3-110
- Безбедна раван
  - Safety plane, 3-154

- Блокери у алатима за ковање, 4-274
- Бочни нагиб  
tilt, 3-115
- Брзи ход, 3-70
- Ваљаност захвата, 3-217
- Варијантни приступ моделирања  
технолошких поступака, 2-31
- Вештачка интелигенција, v, 2-34, 2-37, 2-38, 2-41, 3-89, 8-370, 8-373, 8-374, 8-377, 8-384
- ВИ, 8-370, 8-373, 8-374, 8-375, 8-377, 8-378, 9-409
- ВХП
- Визуелно и хаптичко поље човека, 8-372
- Генеративни приступ моделирања  
технолошког поступка, 2-35
- Генерички пост-процесор, 2-56
- Гранични профил алата, 3-104
- дефокус, 6-330
- дубоко учење, 8-377
- Екструдер, 5-312
- Емулација, 3-234
- Изводљивост захвата, 3-87, 3-217
- Индустрија 4.0, 8-369
- Иницијализација процеса, 5-315
- Иницијална операција обраде, 2-37
- Испуна, 5-305
- Компензација дужине обртног алата, 3-102
- Компензација полупречника обртног алата, 3-102
- Конструкционе криве, 6-343
- Коси праволинијски улаз, 3-127
- Кочећа ребра, 4-265
- Кочећи дистанцери, 4-266
- Крива водиља, 3-111
- Локални радни ход, 3-132
- Љуска
- ободни слојеви модела, 5-304
- Machining feedrate, 3-106
- Магацини алата за ковање, 4-273
- машинско учење, 2-35, 8-378
- Метод преноса, 7-360
- Метода позивања, 7-360
- МКЕ, 4-245
- Носећа структура, 5-307
- НУ ерозимат са жицом, 3-144
- Нулта тачка обратка, 3-154
- Нулта тачка припремка, 3-73
- НУМА, i, ii, iii, 1-13, 2-52, 3-73, 3-74, 3-76, 3-110, 3-230, 3-234, 3-237, 7-357
- НУМАП, 5-291
- Ободне криве површинског модела, 6-343
- Обрадна геометрија алата, 3-102
- Оздрављење површине, 6-342
- Подеона раван, 4-273
- Помоћна крива водиља, 3-113
- пост-процесирање, 2-53
- Путања алата, 3-105
- Радијални пролаз, 3-110
- Радијално ковање спољашњег озубљења, 4-278
- Реверзни инжењеринг
- реверзно моделирање, 6-325
- Релативног кретања алата и обратка, 3-105
- Ресетовање штампача, 5-316
- Ретракција, 5-314
- Референтни геометријски ентитет, 3-93
- Речник са инструкцијама превођења
- речник постпроцесорских директива, 3-229
- РОГЕ, 3-66
- Ротационо ковање, 4-276
- Сајбер-физички технолошки систем, 8-370
- Секундарно вретено
- Subspindle, 3-208
- Серијски интерфејс
- RS-232, 7-359
- Синхронизација захвата, 3-215
- Скенирање, 5-291
- Смер оријентације осе глодала, 3-111
- Стереолитографија**, 5-295
- Стил путање алата, 3-109
- Стратегије вођења алата, 3-123
- Сукцесивне операције извлачења, 4-260
- Температура радне површине, 5-320
- Температуре млазнице, 5-320
- Тесалациони модел, 6-342

Трансформација „оса-на-осу, 3-138  
УЈ, 3-230, 3-234, 3-237, 5-289, 5-314,  
5-317, 5-319, 7-357, 7-358, 7-359,  
7-360, 7-361, 7-362, 7-364  
Улаз у виду завојнице, 3-127  
Умеравање, 6-345  
Управљачка јединица  
УЈ, 2-44, 3-226, 6-339  
Филаменат, 5-312  
Флексибилни технолошки системи  
ФТС, 7-358  
Формат податка, 2-43

Фотополимеризација, 5-296  
Фотосензитивне течне смоле, 5-295  
Фотосензитивни полимер, 5-287  
Хибридни приступ моделирања  
технолошких поступака, 2-37  
Центар трансформације, 3-137  
Циклус  
модуларни захват, 3-227  
Циљана гранична површина обраде,  
3-94  
Чеони нагиб  
Lead, 3-115