

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
КОСОВСКА МИТРОВИЦА

Страхиња Ђуровић

**УНАПРЕЂЕЊЕ КВАЛИТЕТА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ 3D
ШТАМПЕНИХ ДЕЛОВА ПРИМЕНОМ С/НС ГЛОДАЊА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Косовска Митровица,

2024.

UNIVERSITY OF PRIŠTINA
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Strahinja Djurović

**IMPROVING THE QUALITY OF THE MACHINED
SURFACE OF 3D PRINTED PARTS USING CNC MILLING**

DOCTORAL DISSERTATION

Kosovska Mitrovica,

2024.

Комисија за одбрану:

Ментор: др Драган Лазаревић, ванредни професор,
Факултет техничких наука, Косовска
Митровица

Чланови комисије: др Богдан Недић, редовни професор у пензији,
Факултет инжењерских наука, Крагујевац

др Драган Лазаревић, ванредни професор,
Факултет техничких наука, Косовска
Митровица

др Богдан Ђирковић, редовни професор,
Факултет техничких наука, Косовска
Митровица

Датум одбране:

Идентификациона страница докторске дисертације

<i>I Аутор</i>
Име и презиме: Страхиња Ђуровић
Датум и место рођења: 23.07.1995.у Приштини
Садашње запослење: Академија струковних студија косовско метохијска Одсек Звечан, наставник вештина
<i>II Докторска дисертација</i>
Наслов: УНАПРЕЂЕЊЕ КВАЛИТЕТА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ 3D ШТАМПЕНИХ ДЕЛОВА ПРИМЕНОМ СНС ГЛОДАЊА
Број поглавља: 13
Број страница: 163
Број слика и дијаграма: 102
Број табела: 26
Број библиографских података: 286
Установа и место где је израђен: Факултет техничких наука, Косовска Митровица
Научна област (УДК): 621.914; 004.94
Ментор: др Драган Лазаревић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица
<i>III Оцена и одбрана</i>
Датум пријаве теме: 03.11.2022. године
Број одлуке и датум прихватања заснованости теме докторске дисертације: 1511/1 Бр.године 2022.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата: др Драган Лазаревић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Крагујевац др Богдан Ћирковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица
Комисија за оцену докторске дисертације: др Богдан Недић, редовни професор у пензији, Факултет инжењерских наука, Крагујевац др Драган Лазаревић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица др Богдан Ћирковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица
Комисија за одбрану докторске дисертације: др Богдан Недић, редовни професор у пензији, Факултет инжењерских наука, Крагујевац др Драган Лазаревић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица др Богдан Ћирковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Косовска Митровица
Датум одбране дисертације:

САДРЖАЈ

1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ И ДЕФИНИСАЊЕ ТЕМЕ ИСРАЖИВАЊА	10
2. ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА	13
3. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ	15
4. РЕЛЕВАНТНИ БИБЛИОГРАФСКИ ИЗВОРИ	16
5. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	25
6. ТЕОРЕТСКЕ ОСНОВЕ.....	26
6.1 Геометријско димензионисање, толерисање и храпавост.....	26
6.1.1 Геометријске спецификације производа.....	27
6.1.2 Геометријско димензионисање и толерисање.....	28
6.1.3 Храпавост.....	29
6.2 Савремени системи за мерење (<i>СММ</i> , скенери и уређаји за мерење храпавости)	31
6.2.1 Координатне мерне машине (<i>СММ</i>).....	31
6.2.2 <i>3D</i> скенери	36
6.2.3 Уређаји за мерење храпавости.....	40
6.3 Грешке обраде глодањем	43
6.3.1 Грешке линеарних димензија	44
6.3.2 Грешке облика и положаја површина	45
6.3.3 Грешке површинске храпавости.....	49
6.4 Триболошке карактеристике делова добијених <i>3D</i> штампом	49
7. <i>3D</i> ШТАМПА	54
7.1 Технологије <i>3D</i> штампе.....	54
7.1.1 Технологија фузионог таложења (<i>FDM</i>).....	54
7.1.2 Технологија производње објеката ламинирањем (<i>LOM</i>)	57
7.1.3 Технологија селективног ласерског синтеровања (<i>SLS</i>).....	59
7.1.4 Технологија стереолитографије (<i>SLA</i>)	62
7.1.5 Технологија селективног ласерског топљења (<i>SLM</i>).....	65
7.2 Предности и недостаци <i>3D</i> штампе.....	68
7.3 Материјали за <i>3D</i> штампу и њихове механичке особине	71
8. ОБРАДА <i>3D</i> ШТАМПЕНИХ ДЕЛОВА	76
9. МОГУЋНОСТ ИНТЕГРАЦИЈЕ <i>3D</i> ШТАМПАЧА И <i>CNC</i> МАШИНЕ	79
10. ПРИМЕНА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У ДОМЕНУ <i>3D</i> ШТАМПЕ И <i>CNC</i> ТЕХНОЛОГИЈА.....	83
11. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ЊИХОВА АНАЛИЗА.....	91
11.1 Утицај броја слојева у зиду и угла испуне на геометрију <i>3D</i> штампаних епрувета.....	91

11.1.1 Материјали, методе и опрема	91
11.1.2 Резултати и дискусија.....	96
11.2 Утицај броја слојева у зиду и угла испуне на механичка својства <i>3D</i> штампаних материјала.....	100
11.2.1 Материјали, методе и опрема	100
11.2.2 Резултати и дискусија.....	101
11.3 Триболошке карактеристике и површинска храпавост <i>3D</i> штампаног <i>ABS</i> материјала	105
11.3.1 Материјали, методе и опрема	105
11.3.2 Резултати и дискусија.....	106
11.4 Моделирање и предвиђање храпавости површине у хибридном производном процесу коришћењем вештачких неуронских мрежа	108
11.4.1 Материјали, методе и опрема	109
11.4.2 Резултати и дискусија.....	113
11.5 Побољшање димензионе и геометријске тачности и храпавости површине након обраде <i>CNC</i> глодањем.....	120
11.5.1 Материјали, методе и опрема	120
11.5.2 Резултати и дискусија.....	125
11.5.3 Поређење одступања штампаних радних комада пре обраде и након обраде	126
11.5.4 Поређење измерених храпавости површина штампаних радних комада од <i>PLA</i> материјала пре обраде и након обраде.....	131
11.6 Одређивање димензионалне и геометријске тачности помоћу <i>3D</i> скенера	132
11.6.1 Материјали, методе и опрема	132
11.6.2 План мерења	133
11.6.3 Резултати мерења.....	134
12. ЗАКЉУЧАК, НАУЧНИ ДОПРИНОС И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА	140
13. ЛИТЕРАТУРА.....	146

ИЗЈАВА ЗАХВАЛНОСТИ

Изражавам дубоку захвалност свом ментору, професору Драгану Лазаревићу, на несебичном вођењу, стручним саветима и неисцрпној подршци током целокупног рада на докторској дисертацији.

Посебно бих желео да се захвалим професорима Богдану Недићу и Богдану Ћирковићу, чији су стручни савети и константна подршка били непроцењиви током свих фаза мог истраживања. Њихово знање и искуство оставили су значајан траг на квалитет мог рада.

Велику захвалност дугујем Милану Ивковићу, чији су труд и ангажман у експерименталним испитивањима и мерењима били кључни за постизање поузданих резултата, као и Милану Благојевићу, који је својим радом и посвећеношћу допринео тачности и прецизности истраживања.

Захваљујем се и професору Милану Мишићу, на његовим непроцењивим саветима, подршци и помоћи, који су ми били извор додатне мотивације и помоћи у најважнијим тренуцима.

Професору Живчету Шаркоћевићу дугујем велику захвалност за подршку и корисне савете током целог процеса израде дисертације и докторских студија. Професору Срђану Јовићу дугујем захвалност за иницијативу приликом уписа докторских студија.

Велику захвалност дугујем свом брату, сестри и деди за њихову искрену подршку и подстрек. Њихово присуство и вера у мене чинили су да сваки корак напред буде лакши и сигурнији.

Супрузи Марији дугујем неизмерну захвалност за њено разумевање, стрпљење и љубав, који су ми давали снагу и мотивацију. Њена подршка била је мој ослонац у тренуцима изазова и уморних дана, и ово достигнуће посвећујем и њој.

Посебну захвалност упућујем свом ујаку, професору Горану Максимовићу, који је несебичном помоћи, разумевањем и невероватном преданошћу пружио подршку која ниједног тренутка мог школовања и развоја није изостала. Његова вера у мене и мој рад, као и његова спремност да увек пронађе најбоље решење, оставили су неизбрисив траг у овом раду, али пре свега у мом личном развоју.

На крају, са најдубљом захвалношћу посвећујем ово достигнуће својим родитељима. Њихова бескрајна љубав, несебична подршка и непоколебљива вера у мене чинили су темељ свих мојих успеха. Њихова пожртвованост, стрпљење и непоколебљива подршка нису само олакшали пут до овог тренутка, већ су ме обликовали као особу каква сам данас. Ова дисертација је једнако њихов, колико и мој успех, и за све што су учинили за мене дугујем им неизмерну захвалност.

РЕЗИМЕ

Основу ове дисертације представља истраживање технолошких и методолошких аспеката примене *CNC* обраде код *3D* штампаних делова и потребе и могућности интеграције *CNC* машина у процес ове производње. Уводне напомене дефинишу значај теме у контексту савремене индустријске производње, с нагласком на примену *3D* штампе и *CNC* обраде. Истраживања су усмерени на анализу утицаја ових технологија на квалитет и прецизност обрађених делова са циљем развоја ефикаснијих производних процеса.

Полазне хипотезе постављају оквир за истраживање, претпостављајући да се *CNC* глодањем може остварити потребан квалитет функционалних површина *3D* штампаних делова и да се могу унапред одредити додаци за обраду, док се интеграцијом *3D* штампача и *CNC* машине може значајно побољшати прецизност и смањити трошкови производње. Релевантни библиографски извори укључују студије о геометријском димензионисању, толерисању, хрпавости површина, триболошким карактеристикама као и о савременим системима за мерење.

Методе истраживања укључују експериментално тестирање и анализу резултата добијених применом технологија *3D* штампе и *CNC* обраде. Теоретске основе обухватају појмове геометријског димензионисања, толерисања, хрпавости површина, као и анализу грешака обраде глодањем.

У поглављу о *3D* штампи дате су основне информације о различитим технологијама *3D* штампе, као и њихове предности и недостаци. Наведени су материјали који се користе код *3D* штампе и њихове механичке особине, док се у посебном делу анализира обрада *3D* штампаних делова.

Поред унапређења квалитета обрађених површина, као централног аспекта рада, испитиване су и механичке и триболошке карактеристике *3D* штампаних делова, као и примена вештачких неуронских мрежа у оптимизацији хибридног производног процеса за интеграцију *3D* штампача и *CNC* машина.

У делу о истраживањима дат је план рада, приказани су резултати добијени експериментима и анализа резултата. На крају рада, у закључку, изнети су научни доприноси, као и могући правци даљих истраживања у области интеграције нових технологија у производне системе.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: *3D* штампа, *CNC* глодање, хибридна производња, мерење, вештачке неуронске мреже

ABSTRACT

The foundation of this dissertation is the investigation of technological and methodological aspects of *CNC* machining for *3D*-printed parts, as well as the necessity and potential for integrating *CNC* machines into the production process. The introductory remarks highlight the significance of the topic in the context of modern industrial manufacturing, emphasizing the application of *3D* printing and *CNC* machining. The research focuses on analyzing the impact of these technologies on the quality and precision of machined parts, aiming to develop more efficient production processes.

The initial hypotheses establish the framework for the research, assuming that *CNC* milling can achieve the required quality of functional surfaces of *3D*-printed parts and that machining allowances can be predefined. Furthermore, the integration of *3D* printers and *CNC* machines is hypothesized to significantly improve precision and reduce production costs. Relevant bibliographic sources include studies on geometric dimensioning and tolerancing, surface roughness, tribological characteristics, and advanced measurement systems.

The research methodology encompasses experimental testing and the analysis of results obtained through the application of *3D* printing and *CNC* machining technologies. The theoretical foundation covers concepts such as geometric dimensioning and tolerancing, surface roughness, and the analysis of machining errors during milling.

The chapter on *3D* printing provides fundamental information on various *3D* printing technologies, along with their advantages and disadvantages. It includes materials used in *3D* printing and their mechanical properties, with a dedicated section analyzing the machining of *3D*-printed parts.

In addition to improving the quality of machined surfaces as a central aspect of this study, the mechanical and tribological characteristics of *3D*-printed parts are also examined. The application of artificial neural networks for optimizing the hybrid manufacturing process involving the integration of *3D* printers and *CNC* machines is discussed as well.

The research section outlines the work plan, presents experimental results, and provides an analysis of these results. The conclusion summarizes the scientific contributions and suggests possible directions for further research in the field of integrating new technologies into production systems.

KEYWORDS: *3D* printing, *CNC* milling, hybrid manufacturing, measurement, artificial neural networks

ЕНГЛЕСКЕ СКРАЋЕНИЦЕ

CNC – Computer Numerical Control

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

3D - Three-dimensional

FDM – Fused Deposition Modeling

LOM – Laminated Object Manufacturing

SLS – Selective Laser Sintering

SLA – Stereolithography

SLM – Selective Laser Melting

STL – Standard Tessellation Language

CMM – Coordinate Measuring Machine

GD&T - Geometric Dimensioning and Tolerancing

PLA - Polylactic acid

ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene

PETG - Polyethylene terephthalate glycol

PP– Polypropylene

TPU – Thermoplastic polyurethane

PEEK – Polyether ether ketone

PEI – Polyetherimide

PC - Polycarbonate

ULTEM – High-performance Polyetherimide

ANN - Artificial Neural Networks

MRA - Multiple Regression Analysis

HM – Hybrid manufacturing

1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ И ДЕФИНИСАЊЕ ТЕМЕ ИСРАЖИВАЊА

Индустрија и индустријска производња у данашњем свету представљају један од главних покретача економије, привреде и развоја.

Историја индустрије од њеног настанка обележена је великим променама, догађајима и открићима, као и стицањем нових знања, која су променила структуру градова, њихове популације, врсте производа које нуде и начин на који их нуде. Иновације у развоју производних процеса и начин на који запослени раде, постају доминантне за индустријски развој. Индустријски развој може се дефинисати као резултат комбинације три фундаментална аспекта: знања, експериментисања и предузетничке иновације [1]. Ови аспекти су ефективно допринели развоју нових производа и услуга. Индустрија има своју еволуцију која се може сврстати у различите фазе, при чему свака фаза има посебан значај, од прве до четврте револуције. Индустрија 4.0 у потпуности користи све темеље претходних индустријских револуција, али са већим степеном дигитализације, виртуелизације и интеграције нових технологија. Сведоци смо да је индустрија претрпела многе промене и побољшања у свакој од својих фаза, производи су се развијали, мењали су се начини дистрибуције, захтеви купаца, рад људи, као и унутрашњи и спољашњи аспекти. Познавање индустрије 4.0 и свих њених могућности у различитим областима је од суштинског значаја за потпуно искоришћење њеног потенцијала, а такође и за све оне који желе да остваре неки од облика сарадње које она доноси [2, 3].

Од почетка индустријске револуције, дошло је до великог повећања квалитета и квантитета производње применом индустријске механизације, од машина на парни погон до модерне аутоматизације [4]. У последње време, развој и примена технологије производне индустрије убрзано се повећава, о чему сведочи све савременија опрема која се користи за иновације и рад на производу, као што је пре свега рачунаром управљана машина (*CNC*) [5].

Глодање представља један од најчешће коришћених производних процеса у индустрији због своје свестраности за генерисање сложених облика код различитих материјала са високим квалитетом. Услед развоја машинских операција, пре свега рачунаром управљане машине (*CNC*), рачунаром подржаног дизајна/производње (*CAD/CAM*) и алата за резање у последњих неколико деценија, обим и значај глодања су се повећали у кључним индустријама као што су ваздухопловство, аутомобилска индустрија и производња компоненти, итд [6].

Глодање, гравирање, бушење само су неке од области у којима се користе *CNC* машине. На основу корисничке команде, рачунарска технологија користи се за контролу, рашчлањивање и извршавање одређених наредби. У производној индустрији, употреба *CNC* машина у великој мери утиче на повећање производње [7].

Појам *CNC* технологија подразумева начин на који *CNC* машина ради тј. шта је све потребно да би машина у потпуности задовољавала своју улогу у производном

процесу. Употреба *CAD/CAM* система за конструисање и моделирање и *CNC* машине за израду одређених производа омогућава велику прецизност обраде и израде као и стандардизованост квалитета.

Захваљујући практичним и теоријским истраживањима везаним за употребу *CAD/CAM* система за конструисање, моделирање и израду машинских делова може се закључити следеће [8]:

- Смањење припремно-завршних времена и трошкова израде: При употреби класичних машина често су потребни специјални уређаји за позиционирање предмета, те шаблони за вођење алата по контури,
- Припрема се одвија у бироима, тако да машина може истовремено производити друге производе,
- *CNC* технологија је веома прецизна технологија, осигурава велику тачност обраде и
- Могућност обједињавања више операција једне машине, те чак обједињавање операција са више машина уз само једну припрему *CNC* машине.

Поред традиционалних начина производње и машинске обраде делова, постоји и релативно нови начин производње а то је адитивна производња или *3D* штампа.

3D штампа је технологија којом се, директно из дигиталног приказа просторног или тродимензионалног (*3D*) модела израђеног у неком од *CAD* алата, производи функционалан и релативно комплексан радни прототип. *3D* штампа гради модел, за разлику од *CAM* технологија које геометрију реализују уклањањем материјала. Градња *3D* модела базира се на дигитално резаним (*sliced*) слојевима модела који се у физичком простору слој по слој лепе у финални облик. Предност градње у слојевима је израда комплексних облика које је класичним методама готово немогуће изградити. Применом технологије *3D* штампе могуће је изградити комплексне структуре унутар модела као и танке слојеве [9].

Процес *3D* штампе одвија се у следећим корацима: Најпре се креира *3D* модел помоћу изабраног *CAD* софтвера за моделирање. Штампач чита податке о пресеку из датотеке и користи течност, прах или жицу да би их комбиновао у готов део. Пресеци се штампају слој по слој, а затим се пресеци сваког слоја лепе на различите начине како би се створило чврсто тело. Технологијом *3D* штампе могу да се произведу сложенији делове, истовремено увелико повећавајући брзину и ефикасност производње, што има велики ефекат при уштеди и смањењу повезаних улазних трошкова [10].

Технологијама *3D* штампе могу се производити делови веома сложеног облика, без потребе за разматрањем проблема избора конвенционалног или неконвенционалног поступка обраде, и могу се решити проблеми дизајна и производње. Стога је технологија *3D* штампе веома важан нови производни метод у индустрији [11].

CNC обрада се традиционално користи за производњу делова у крајњој употреби, али се такође прихвата као секундарни процес за технологију *3D* штампе.

Предмет истраживања у овој дисертацији представља могућност комбиновања 3D штампе и *CNC* обраде ради унапређења квалитета обрађених површина.

Предложена тема докторске дисертације је:

„УНАПРЕЂЕЊЕ КВАЛИТЕТА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ 3D ШТАМПЕНИХ ДЕЛОВА ПРИМЕНОМ *CNC* ГЛУДАЊА“

2. ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

На основу досадашњих истраживања у области *3D* штампе и обраде *CNC* глодањем, може се закључити да није постигнут значајан напредак при креирању модела који ће да обједини обе производне методе како би се унапредио квалитет делова, испитала обрадивост материјала за *3D* штампу, смањило време производње и дали оптимални параметри, како код *3D* штампе као производне технологије, тако и *CNC* глодања као технологије која се користи као завршна обрада након *3D* штампе.

Очекивани резултати савремених истраживања треба да допринесу унапређењу науке у области производног машинства јер се баве анализом савремених проблема и унапређења у оквиру *IV* индустријске револуције. Важан циљ и значај истраживања се великим делом односи на интеграцију *3D* штампе, *CNC* обраде и примене метода вештачке интелигенције у циљу унапређења производних обрадних процеса.

Циљ истраживања реализованих у оквиру овог рада представља испитивање могућности обраде готових, *3D* штампаних делова, поступцима *CNC* обраде, ради изналажења оптималних параметара и побољшања квалитета добијених делова.

Рад се састоји из 13 поглавља.

У поглављу 1 дате су уводне напомене које обухватају дефинисање теме истраживања и значај проучавања савремених производних процеса. Ово поглавље садржи основне концепте и методолошки оквир рада.

Поглавље 2 фокусирано је на дефинисање циљева истраживања, који укључују унапређење ефикасности и прецизности производње кроз интеграцију *3D* штампе и *CNC* машина, као и истраживање примене вештачке интелигенције у овим областима.

У поглављу 3 разматрају се полазне хипотезе, којима се предпоставља да ће да ће нове технологије омогућити значајна побољшања у производним процесима, укључујући смањење трошкова и повећање продуктивности.

Поглавље 4 пружа преглед релевантних библиографских извора који подржавају анализу трендова у *3D* штампи, *CNC* обради и применама вештачке интелигенције у производњи.

У поглављу 5 описане су методе истраживања, које укључују комбинацију теоријских и експерименталних приступа, као и употребу софтверских алата за анализу података.

Поглавље 6 садржи теоријске основе истраживања. У овом поглављу анализирани су концепти као што су геометријско димензионисање, толерисање и храпавост површина, савремени мерни системи (*CMM*, скенери и уређаји за мерење храпавости), грешке обраде глодањем, и триболошке карактеристике *3D* штампаних делова.

У поглављу 7 детаљно су описане технологије 3D штампе, њихове предности и недостаци, као и механичке особине различитих материјала који се користе у 3D штампи.

Поглавље 8 бави се обрадом 3D штампаних делова, са посебним фокусом на изазове и могућности у процесу дораде ових делова након штампања.

У поглављу 9 истражују се могућности интеграције 3D штампе и CNC машина кроз хибридни производни процес, уз анализу потенцијала за побољшање производних капацитета и квалитета производа.

Поглавље 10 анализира примену вештачке интелигенције у области 3D штампе и CNC обраде, са нагласком на њен утицај на оптимизацију процеса и унапређење аутоматизације у производњи.

Поглавље 11 приказује план истраживања, материјале и опрему који су коришћени као и резултате, уз анализу примене различитих технологија и процеса.

На крају рада, у 12-том поглављу, су дати закључци и правци будућих истраживања, а у поглављу 13 преглед коришћене литературе.

3. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

3D штампа сложених делова представља генерално брже, јефтиније и лакше решење од многих других технологија производње *3D* објеката. Она омогућава израду модела делова и склопова од више различитих материјала, различитих механичких и физичких својстава. Овом технологијом се могу производити модели који верно oponашају изглед, утисак и функционалност производа.

У последњих неколико година *3D* штампа су постаје финансијски доступна малим и средњим предузећима, чиме се израда прототипа помера из института и служби развоја великих индустријских предузећа. Сада је могуће и истовремено комбиновање различитих врста материјала. Осим израде прототипова, *3D* штампа нуди велики потенцијал за производњу финалних производа у различитим пољима примене.

3D штампа и *CNC* машинска обрада укључују *3D* датотеке и процес производње је аутоматизован. Оба поступка омогућају производњу робусних, стабилних и потпуно функционалних делова. Крајњи делови се могу произвести било којом методом, али је посебно интересантно комбиновати их како би се постигао најбољи могући квалитет, а неки од резултата тога су: прецизније димензије, брзина, величина и сл.

У случају појединачне производње делова сложене геометрије, поступцима *3D* штампе много једноставније (без припреме производње), брже и економичније, може се добити готов део. Међутим, добијени део најчешће захтева квалитет у виду толерисаних дужина, облика и положаја као и одређени квалитет храпавости површина. Тако би основна хипотеза била да се *CNC* обрада након *3D* штампе дела намеће као једно од решења којим ће се постићи захтевани квалитет добијених делова.

Следећа хипотеза је да се методе вештачке интелигенције могу применити за добијање предиктивних модела за одређивање оптималних параметара *3D* штампе и параметара *CNC* обраде.

Такође, може се очекивати и напредак у квалитету *3D* штампе у виду нових технологија, материјала и све већој примени у индустрији и да ће *3D* штампачи са интегрисаним модулима за *CNC* обраду постати индустријски стандарди у многим областима производње.

4. РЕЛЕВАНТНИ БИБЛИОГРАФСКИ ИЗВОРИ

У новом добу 3D штампе, све шире је поље примене у којем се интегришу конвенционалне метода производње са 3D штампом. CNC обрада се показала као још један алат који корисници 3D штампаних делова могу искористити за оптимизоване 3D штампане делове. Као секундарни процес, CNC обрада обезбеђује додатну тачност димензија 3D штампаних делова уз задржавање свих предности технологија 3D штампе као што је случај са методом фузионог таложења (FDM).

Постоји много параметара у процесу FDM штампе који утичу на квалитет, геометријска и механичка својства као што су оријентација грађења, брзина штампања, дебљина слоја, угао испуне, тип испуне, густина испуне итд. Многи истраживачи су се бавили утицајем различитих параметри штампања на механичке особине штампаних делова.

Ashtankar и остали истраживали су ефекат оријентације 3D штампаних делова од ABS материјала направљених FDM технологијом, а резултати су показали да се затезна чврстоћа смањила када је оријентација узорака била поравната од 0° до 90° [12].

Montero и остали усвојој студији су истраживали параметар процеса штампања и њихов утицај на механичка својства делова произведених FDM технологијом. Ваздушни зазор и оријентација углова штампе имали су већи утицај на затезну чврстоћу од температуре, ширине и боје филамента. Други закључак односи се на затезну чврстоћу, која би се повећала у случају када је ваздушни зазор негативан [13].

Gunasekaran и остали су у својој студији показали су да узорци штампани са 100 % густином испуне имају побољшана механичка својства у погледу затезне чврстоће и тврдоће [14].

Dawoud и остали у својој студији су истраживали утицај процесних параметара штампе, посебно различите комбинације ваздушног зазора и углова штампе на механичке особине узорака од ABS материјала. Резултати показују да се са FDM технологијом и одређеним параметрима штампе, механичка својства могу упоредити са онима код бризганих делова [15].

Chacon и остали су у својој студији испитивали утицај висине слоја и оријентације градње на механичка својства PLA узорака произведених FDM технологијом. Открили су да је висока затезна чврстоћа резултат мале висине слоја, а затезна чврстоћа значајно варира за узорке са равном оријентацијом [16].

Према студији *Gebise* и осталих, за материјал *ULTEM 9085*, приказано је да у поређењу са другим параметрима штампе као што су ваздушни зазор, ширина и угао испуне, број слојева у зиду има мали утицај на механичка својства [17].

Liu и остали истраживали су у својој студији утицај параметара штампе (број слојева у зиду, угао штампе и тип испуне) на механичка својства штампаних делова. Открили су

да су два слоја зида, равна оријентација градње и троугласта испуна оптимални параметри [18].

Mishra и *Mahapatra* проучавали су утицај броја слојева у зиду и других параметара на затезну чврстоћу узорака штампаних *FDM* технологијом. Закључили су да се затезна чврстоћа повећава када се број слојева у зиду повећава [19].

Rodriguez-Panes и остали закључили су да оријентација угла штампе, висина слоја и густина испуне имају велики утицај на механичка својства штампаних делова. Такође су приметили да *PLA* има боља механичка својства од *ABS*-а [20].

Студија *Dwiyati* и осталих показала је да су већа затезна чврстоћа и максимална сила присутна код узорака са ширим слојевима. Највећа затезна чврстоћа и силе су примећене у аксијалном правцу штампаних узорака [21].

Nikiema и остали испитивали су утицај броја слојева у зиду на механичка својства. Утврдили су да је са већим бројем слојева у зиду узорак имао већу чврстоћу. Међутим, како се број зидова повећава, деформација узорака опада, уз смањење деформације од 70 % између узорка са 1 слојем у зиду и узорака са 10 слојева у зиду [22].

Eryildiz је у својој експерименталној студији истраживао утицај 100% густине испуне и максималног броја слојева у зиду на чврстоћу на савијање. Он је закључио да додавање максималног броја слојева, повећава чврстоћу померањем зоне концентрације напона са спољних ивица на центар узорка [23].

У другој студији *Eryildiz* приказује да се затезна чврстоћа смањила када је оријентација грађења делова била поравната од равног ка горе удесно и угла испуне од 0° до 90° . За усправну оријентацију конструкције добијена је 36 % мања затезна чврстоћа у односу на равне због правца оптерећења и начина лома. Такође се примећује да је оријентација грађења имала велики утицај на механичка својства [24].

Swikla и остали су у њиховој студији показали да је најбољи скуп параметара 2-3 слоја у зиду, испуна у облику саћа и густина испуне од 40-50 %. Ако је приоритет максимална чврстоћа, потребно је повећати број слојева у зиду [25].

Tymrak и остали испитују механичка својства узорака штампаних *ABS* и *PLA* материјалом, узимајући у обзир различите дебљине слојева и оријентацију угла штампе (остатак параметара је имао стандардне вредности и 100 % испуне). Резултати су показали да је оријентација $+45^\circ/-45^\circ$ и дебљина слоја од 0.2 mm дају најбољу резултате код испитивања затезне чврстоће. Примерци штампани са дебљином слоја 0.4 mm и они са оријентацијом $0/90^\circ$ показују највећи модул еластичности током испитивања [26].

Supar и остали су у свом раду објаснили цео процес материјализације – од припреме модела до припреме штампача. Студија је имала за циљ да процени грешке у димензијама штампаних делова и да савете како их смањити и исправити [27].

Истраживана је такође храпавост површине као и триболошко понашање 3D штампаних делова.

Gurrata и *Regalla* су испитивали трење и хабање код узорака од *ABS* материјала штампаних *FDM* технологијом. Они су испитивали утицај брзине, оптерећења и оријентације на брзину хабања и коефицијент трења делова. Закључили су да брзина има више утицаја на трење него оријентација при фиксном оптерећењу [28].

Norani и остали испитивали су најоптималније параметре 3D штампања анализом коефицијента трења и хабања. Студија је открила да висина слоја значајно утиче на коефицијент трења и стопу хабања. Открили су да температура млазнице од 234 °C и висина слоја од 0.1 mm представљају најоптималније параметри за смањење хабања и коефицијента трења [29].

Garg и *Singh* користили су *Nylon 6 - Fe* композитни материјал и истраживали трење и хабање делова. Они су упоредили карактеристике трења и хабања овог композита са *ABS* материјалом. Овај експеримент је изведен на поставци пин по диску варирањем оптерећења (5, 10, 15 и 20 N) и брзине (200 и 300 o/min). Закључили су да новоразвијени композит има већу отпорност на хабање од чистог *ABS* материјала [30].

Hanon и сарадници су испитивали триболошко понашање *PLA* и *ABS* полимера који су штампани у различитим бојама и при различитим температурама. Резултати динамичког коефицијента трења показују да је *PLA* узорак бољи од *ABS* узорка у свим температурним опсезима. 3D штампани *PLA* примерак је тестиран са различитим подешавањима, што је открило неке недоследности, међутим, употреба различитих боја показала је јасну различитост [31].

Roy и остали испитивали су триболошко понашање узорака штампаних од *PLA* и *ABS* полимера користећи конфигурацију пин по диску. Они су анализирали ефекте параметара штампања на триболошко понашање 3D штампаних *ABS* и *PLA* узорака [32].

Nedić и остали користили су трибометар са конфигурацијом блок на диску, и дошли до закључка да је коефицијент трења релативно нижи код *PLA* узорака у односу на *ABS* узорке [33].

Tahir и остали користили су методу пин по диску да истраже унутрашњу структуру 3D штампаних *ABS* узорака. Закључили су да присуство унутрашње структуре може смањити и хабање и трење [34].

Voparai и сарадници припремали су композитни материјал са већом отпорношћу на хабање и различитим пропорцијама. Резултати код њиховог материјала показују мање силе и коефицијенте трења од комерцијално коришћеног *ABS* материјала за 3D штампање [35].

У својој студији, *Cococetta* и остали испитивали су утицај процеса штампања и процеса глодања као завршне обраде на квалитет површина термопластичних

материјала. Њихова открића су показала да хлађење ефективно смањује хабање алата током глодања и постиже значајно смањење неравнина и до 90 % [36].

Jenarthanan и остали приметили су у својој студији да глодала са малим угловима спирале постижу највеће силе резања, најмања храпавост површине и фактор деламинације. Храпавост површине, сила резања и фактор деламинације се повећавају са повећањем брзине помака, а опадају са повећањем брзине резања [37].

Све више истраживача се бави испитивањем утицаја параметара 3D штампе на храпавост површине. Користећи вештачке неуронске мреже и анализу вишеструке регресије да креирају моделе за предвиђање храпавости површине.

Shukor и сарадници су у својој студији машински обрађивали полипропиленске делове и закључили да се просечне вредности површинске храпавости од 0.599 μm могу добити уз параметре од 1241 mm/min брзине помака, 4138 o/min и дубине од 0.5 mm [38].

Saad и остали су закључили да је смањење брзине штампања, дебљине слоја и температуре штампе, који су *FDM* улазни параметри за *ANN*, резултирало 12.36 % већом прецизношћу од *RSM* методе и минимална храпавост површине је била приближно 2.011 μm [39].

Boschetto и остали користили су вештачке неуронске мреже за предвиђање храпавости површине делова направљених од *ABS* материјала. У њиховој студији испитиван је ефекат различитог броја неурона и активационих функција [40].

Plaza и сарадници проучавали су утицај дебљине слоја, оријентације грађе и брзине на храпавост површине делова направљених од *PLA* материјала. Користили су факторски план експеримента (4 нивоа дебљине слоја, 3 нивоа за оријентацију изградње и 3 нивоа брзине). Вештачка неуронска мрежа са алгоритмом за обуку *FFBP* (Feed Forward Back Propagation) коришћена је за предвиђање храпавости површине делова. Резултати су показали да брзина није имала утицаја на храпавост површине, док је дебљина слоја имала значајан утицај [41].

Luu и остали су у истраживању узимали у обзир температуру, дебљину слоја и густину испуне у *FDM* процесу како би развили моделе за предвиђање храпавости површине. За постизање резултата коришћени су модели вештачке неуронске мреже, машине за векторску регресиону подршку (*SVR*) и регресионе анализе. Њихови предложени модели су коришћени за истраживање односа између улазних параметара и храпавости површине штампаних делова. Ова студија је показала да модел вештачких неуронских мрежа даје боље резултате од модела мултиваријантне линеарне регресије [42].

Nagarajan и сарадници направили су вештачку неуронску мрежу, која представља комбинацију концептуалног моделирања димензионалне анализе и класичне *ANN*. Они су побољшали квалитет производа делова произведених помоћу *FDM* увођењем свог модела [43].

Kandanand и остали у својој студији користили су вештачку неуронску мрежу за предвиђање храпавости површине делова штампаних *FDM*. Користили су дебљину слоја, температуру радне површине и брзину штампе за улазне параметре модела [44].

Reeves и *Cobbs* су моделирали храпавост површине *3D* штампаних делова у функцији дебљине слоја и угла штампе између површине на нормалан и вертикални правац. Показали су да храпавост површине зависи од микротопографије [45].

Ahn и остали су у свом раду је предложили нови приступ моделирању храпавости површине код *FDM* технологије. На основу стварне расподеле храпавости површине *FDM* делова, представљен је теоријски модел за изражавање расподеле површинске храпавости према променама угла штампе сагледавањем главних фактора који пресудно утичу на квалитет површине. Предложени израз се проверава имплементацијом и поређењем са емпиријским подацима. Такође, анализира се и дискутује ефикасност главних фактора [46].

Ограничења у процесу *3D* штампе, као што су мања храпавост и већа тачност димензија, довела су до потребе да се технологија *3D* штампе комбинује са конвенционалним методама производње. Овај концепт је довео до развоја хибридног производног процеса (*HM*) који комбинује *3D* штампу и *CNC* производњу.

Pămărac и сарадници истраживали су параметре глодања за машинску обраду *FDM* делова, где су *PLA* и *ABS* били главни материјали. Према студији, број обртаја од 3500 o/min је била оптимална брзина за глодање *3D* штампаних делова [47].

Amanullah и остали дизајнирали су хибридну производну форму која је у стању да комбинује операције глодања и штампања на истој структури. Иновација је инсталирана на екструдеру *FDM*-а и *CNC* резне главе на ротационој структури коришћењем инфрацрвених сензора чиме је превазиђен проблем неусклађености и поједностављена структура механизма за обраду резним алатом [48].

Gurguras и остали користили су *MRA* да би предвидели оптималне вредности за различите параметре, укључујући брзину (n), висину (h), брзину штампања (v), проток компензације материјала (f), дубину глодања (ap) и брзину помоћног кретања (Vf). Према резултатима, примарни фактор који утиче на храпавост површине била је висина слоја (h). Минимална храпавост Ra је постигнута на највишој висини слоја при мерењу у различитим правцима. Након анализе резултата, установљено је да проток компензације материјала (f) није утицао на храпавост површине на овој специфичној висини слоја. Такође је утврђено да је нижа брзина оптимална јер се при већој брзини (v) проузрокује налепљивање материјала на површини алата [49].

Li и остали истраживали су хибридни производни процес. У зависности од угла штампе (од 20 до 90 степени), храпавост површине је варијала. У овом хибридном процесу, након процеса глодања, смањење храпавости површине било је у распону од 17.332 и 56.021 μm до 4.870 и 24.511 μm [50].

Kulkarni и *Dutta* су у свом раду развијали методологију за интеграцију 3D производње и традиционалних процеса уклањања материјала у интегрисани производни процес. Напреављени су модели под којима би ова интеграција била корисна и развијени су алгоритми за интеграцију. Као примере, разматрали су две технологије 3D штампе које користе операције уклањања материјала као део свог процеса [51].

Boschetto и остали су у свом раду развијали методологију која може да откључа могућност да се делови направљени моделирањем фузионисаног таложења заврше машинском CNC обрадом. Разматрана је променљива дубина резања како би се избегли унутрашњи дефекти и елиминисала почетна морфологија површине. Експериментална истраживања су омогућила да се утврди како дубина резања треба да буде подешена као и функција угла штампе. Студија случаја коју карактеришу функционалне површине потврдила је применљивост методе на сложену геометрију. Постигнуто је велико смањење просечне храпавости и поузданост готових површина [52].

Pandey и остали кажу да се као алтернатива хемијској обради може сматрати машинска обрада резањем, која представља једну од метода уклањања материјала са површина делова. Главни недостатак ове методе је што се не може користити код делова са сложеном геометријом [53].

Keresztes и остали испитивали су обрадивост полимера. Закључили су да се повећањем помака и дубине резања, сила резања смањује [54].

Noorani и остали обрађивали су 3D штампане термопласте и постигли високу тачност и одличну завршну обраду, што је још увек ограничење за 3D штампу [55].

Adeniji и остали испитивали су храпавост површине и формирање неравнина при глодању поликарбоната са аспекта параметара глодања. Закључили су да дубина резања није имала велики утицај на храпавост површине, али је стварање неравнина било подстакнуто ефектом подмазивања и радијусом резне ивице [56].

Hussain и остали су у својој студији проучавали обрадивост полимерних материјала ојачаних стакленим влакнима. Утврђено је да са повећањем помака, храпавост површине расте, док се смањује са повећањем брзине резања, док дубина резања најмање утиче на храпавост површине. На силу резања у већој мери утиче помак него брзина резања [57].

Ramulu и остали испитивали су машинску обраду полимерних композита и дошли до закључка да повећање брзине резања доводи до мање храпавости површине [58].

Wang и остали истраживали су процес глодања полимерних композита ојачаних угљеничним влакнима, и открили су да се температуре повећавају са брзином резања [59].

Поред оптимизације параметара 3D штампе, постоји и велики број истраживања која се баве применом вештачких неуронских мрежа у процесу оптимизације параметара CNC обраде.

Benardos и сарадници користили су вештачке неуронске мреже у процесу чеоног глодања Al легуре. У моделу су коришћени параметри као што су дубина резања, корак по зубу, захватање резног алата и силе резања. Добијени резултати ове студије показали су да вештачка неуронска мрежа може бити веома прецизна [60].

Anuja и *Kirubakaran* су развили модел вештачке неуронске мреже заснован на параметрима резања у циљу предвиђања хрпавости површине процеса стругања *AISI H13* челика. За предиктивни модел коришћени су различити скупови података за обуку. Они су анализирали способност *ANN* модела да предвиди хрпавост површине и одредили средњу квадратну грешку. Њихова студија се фокусира на развој предиктивног модела за површинску хрпавост. Њихов модел, са мањом величином података за обуку, постигао је средњу тачност до 95.96 % [61].

Nalbant и остали испитивали су интеракције између параметара резања у процесу стругања челика *AISI 1030* и њихов утицај на хрпавост површине. Развијен је модел за предвиђање хрпавости површине користећи *ANN*. Највећа тачност предвиђања у моделирању *ANN* постигнута је коришћењем алгоритма за обуку *SCG* са девет неурона [62].

Hossein и сараднициу свом истраживању користили су анализу вишеструке регресије и вештачку неуронску мрежу како би предвидели и минимизирали хрпавост површине у процесу глодања легуре *Al-7075*. Након процеса глодања, потребно је упоредити предвиђени модел са стварним Ra измереним подацима. Закључили су да резултати показују скоро исте вредности у оба случаја, и мерене и предвиђене [63].

Meral и остали закључили су да параметри као што су брзина резања и помак значајно утичу на хрпавост површине код бушења материјала *AISI 1050*. Закључили су да је регресиони модел другог реда најпогоднији метод за предвиђање хрпавости површине [64].

Asiltürk и *Çunkaş* користили су различите параметре резања и мерили хрпавост површине у процесу стругања *AISI 1040* челика. Користили су вишеструку регресију и вештачке неуронске мреже како би изградиле предиктивне моделе који зависе од брзине, помака и дубине резања. Највећа исправност је постигнута са *ANN* моделом за предвиђање хрпавости површине, затим са анализом вишеструке регресије [65].

Lin и сарадници представили су модел развијен коришћењем вишеструке регресионе анализе и *ANN* заснованих на машинским вибрацијама и параметрима резања у процесу глодања легуре алуминијума *Al 6061*. Резултати су показали да за све податке о обуци, вештачке неуронске мреже постижу већу тачност предвиђања од анализе вишеструком регресијом [66].

Yilmaz и остали у својој студији баве се предвиђањем храпавости површине помоћу неуронских мрежа са два улаза: помак и брзина резања у обради полиамида. Према резултатима, *ANN* модел развијен у циљу предвиђања вредности храпавости површине у процесу глодања дао је прихватљиве и тачне резултате [67].

Tsai и остали предложили су *ANN* и модел статистичке регресије у циљу предвиђања храпавости површине у процесу глодања легуре алуминијума *Al 6061* на основу параметара резања (дубина резања, брзина резања и брзина помака). Резултати показују већу тачност у предвиђању површине са *ANN* моделом него са регресионим моделом. Модел заснован на *ANN*, који је имао два скривена слоја, показао је већи ниво тачности (99.27 %) у поређењу са моделом са само једним скривеним слојем (95.87 %) [68].

Zain и сарадници закључили су да у моделирању вештачке неуронске мреже, фактори који одређују тачност предвиђања јесу број неурона и слојева у скривеним слојевима. Према моделу предвиђања, најбоља вредност храпавости површине може се добити при малом помаку, великој брзини и радијалном углу у процесу глодања легуре титанијума [69].

Shie и остали радили су са графитом високе чистоће и креирали *ANN* модел за предвиђање храпавости површине у свом истраживању. Резултати предвиђања су били много тачнији са *ANN* моделом него са традиционалним методама, методом планирања експеримента и Тагучи методом [70].

Jafarian и остали користили су три *ANN*-а за предвиђање храпавости површине у процесу глодања композита ојачане алуминијумске матрице. За овај иновативни процес за обуку *ANN*-а коришћени су еволутивни алгоритми уместо традиционалних који су користили пропагацију уназад. Добијени резултати су показали да обучене неуронске мреже са генетским алгоритмима представљају моћно средство за испитивање ефекта сваког ограничења на излазни модел са високим нивоом тачности [71].

Kosarac и остали су у свом истраживању користили *ANN* како би смањили храпавост површине у процесу обраде легуре алуминијума *AA 7075*. Закључили су да *ANN* обучен са малим подацима може предвидети просечну храпавост површине *Ra* [72].

Yanis и сарадници истраживали су перформансе *RSM* и *ANN* у редоследу предвиђања *Ra* у процесу обраде угљеничног челика *SS 400*. Према резултатима, *ANN* модел је прецизније предвидео *Ra* у поређењу са *RSM* моделом [73].

Krayel је дао нови приступ предвиђању храпавости површине процесу стругања легуре алуминијума уз помоћ вештачке неуронске мреже. Експериментом је добијен велики скуп података за тестирање и обуку неуронске мреже. Испитивана су три параметра: брзину резања, помак и дубина резања. Ова студија је показала да су измерени и предвиђени резултат изузетно блиски једно другом [74].

Dhokia и сарадници у својој студији су предвидели храпавост површине у *CNC* процесу обраде полипропилена са неуронским мрежама. Резултати су показали да би средњи опсег параметара обраде довео до боље храпавости површине, док је при максималној брзини помака, дубини резања и брзини просечна храпавост површине била највећа [75].

Из наведене литературе се може закључити да су се истраживачи углавном фокусирали на:

- Утицај промене параметара *3D* штампе на механичке особине штампаних делова,
- Истраживање квалитета површинске храпавости и триболошких карактеристика површина штампаних делова,
- Примену *ANN* при оптимизацији параметара *3D* штампе са аспекта храпавости површине,
- Истраживање хибридног процеса са аспекта одређивања оптималних параметара завршне обраде без примене *ANN* и
- Примену *ANN* за одређивање оптималних параметара квалитета површине код *CNC* обраде.

Међутим мало истраживача се бави применом *ANN* за моделирање и предикцију храпавости површине код хибридне производње (*HM*) након *CNC* глодања. Циљ ове дисертације је да се прикажу ефекти параметара обраде глодањем на храпавост *3D* штампаних делова код хибридне производње и креира модел за предвиђање храпавости површине коришћењем вештачких неуронских мрежа (*ANN*).

5. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

У истраживањима су коришћене аналитичко експерименталне методе које обухватају следеће активности и примену одговарајућих метода:

- Истраживање литературе,
- Штампање већег броја епрувета и готових *3D* делова,
- Испитивања механичких карактеристика *3D* штампаних епрувета,
- Испитивања обрадивости штампаних *3D* делова,
- Мерења квалитета обрађених делова са аспекта тачности мера и храпавости обрађених површина применом савременим мерним уређајима,
- Примену вештачке интелигенције, регресионе анализе, неуронских мрежа при избору оптималних параметара и
- Статистичку обраду података.

6. ТЕОРЕТСКЕ ОСНОВЕ

Обрада материјала, мерење и квалитет површина представљају важан сегмент савремене машинске индустрије. Свако технолошко решење захтева прецизно дефинисање геометријских параметара, толеранција и храпавости површина, што утиче на функционалност и трајност делова. Савремени системи за мерење, као што су координатне мерне машине (*СММ*), скенери и уређаји за мерење храпавости, омогућавају висок ниво прецизности у провери димензија и површинских својстава. Поред тога, у процесима обраде, као што је глодање, често долази до различитих грешака које могу утицати на коначни квалитет производа. Све ове методе и процеси тесно су повезани са триболошким карактеристикама делова произведених помоћу *3D* штампе, која као технологија постаје све значајнија у производњи делова сложених геометрија са специфичним својствима трења и хабања.

6.1 Геометријско димензионисање, толерисање и храпавост

3D штампа добија све већу пажњу у последњој деценији као свестран производни процес. Помоћу технологија *3D* штампе могу се произвести делови сложених облика, са посебним акцентом на карактеристике као што су унутрашње шупљине и решетка унутрашња структура. Ове сложене геометрије или нису изводљиве или су веома скупе у произведеним традиционалним (конвенционалним) процесима.

Процес производње *3D* штампе доноси изазове као што су недовољне тачности димензија и већа храпавост површина, које се првенствено могу приписати методи производње слој по слој и скупљању материјала при хлађењу [76]. На ову варијабилност тачности димензија и површинских карактеристика утичу фактори као што су дебљина слоја и углови штампе, што захтева пажљиво разматрање током процеса *3D* штампе. Међутим, ови изазови се могу решити технологијама накнадне обраде, као што је конвенционална обрада која нуди одржива решења за побољшање квалитета објеката након *3D* штампе.

Ово ствара нове изазове у одржавању и комуникацији димензионалне и геометријске тачности произведених делова и храпавости површина. Да би се произвео део који задовољава функционалне потребе, неопходна је спецификација тих потреба кроз геометрију, материјал и толеранције [77]. У традиционалној пракси производње, део се дизајнира, а затим се генеришу подаци или цртежи *3D* модела. Ови модели и цртежи укључују спецификацију геометрије, материјала, толеранције, завршне обраде површине и све друге додатне захтеве за правилно функционисање производа. Свака од ових спецификација има добро утврђене стандарде који регулишу и обезбеђују недвосмислено тумачење спецификација од стране различитих заинтересованих страна. Тако серија стандарда *ISO 10303* регулише спецификацију геометрије, а серија стандарда *ISO 1101* и *ASME Y14.5* регулише спецификацију толеранције. Правилно функционисање дела зависи од производње дела у оквиру спецификације, укључујући и дозвољена одступања (толеранције). Ови постојећи стандарди, иако ригорозни, развијени су на основу могућности традиционалних производних процеса.

6.1.1 Геометријске спецификације производа

Геометријске спецификације производа (ГСП) су, поред спецификација материјала, кључни део информација неопходних за ефикасно пројектовање, планирање, производњу и праћење производа током њиховог животног циклуса. Ово посебно важи за механичке делове, односно компоненте или склопове различитих машина и уређаја. Појединачне компоненте морају да испољавају одговарајуће карактеристике различитих делова своје геометрије, а то су пре свега површине, али и линије и тачке на тим површинама, посматране у тродимензионалном ($3D$) или дводимензионалном ($2D$) простору (технички цртежи). Ови основни градивни блокови се генерално називају геометријским карактеристикама. У зависности од намене и функције компоненти у склоповима, различите карактеристике играју мање или више важне улоге у обезбеђивању да су компоненте састављене у скупове и да извршавају своје задатке [78].

Бројни *ISO* стандарди који одређују основне принципе, правила и симболички језик који се тиче метода техничких спецификација производа подељени су у групу стандарда који се односе на техничку документацију производа (ТДП) и група стандарда за геометријске спецификације производа.

ТДП група обухвата скуп стандарда који постављају основе приказивања техничких производа на различитим техничким цртежима: принципе и правила за приказивање производа у $2D$ пројекцијама просторних објеката, техничке фонтове, носаче техничких цртежа, опрему за израду цртежа итд.

Група ГСП стандарда је опсежна и поставља принципе и правила за дефинисање геометријских спецификација производа које нису само визуелне и стога захтевају договорени и координисани симболички језик.

ISO стандарди за геометријске спецификације производа (ГСП) се могу сврстати на [79]:

- Фундаменталне и
- Опште *ISO* ГСП стандарде.

Односи између *ISO* ГСП стандарда могу се најбоље разумети посматрањем њихове пирамидалне структуре (слика 6.1).

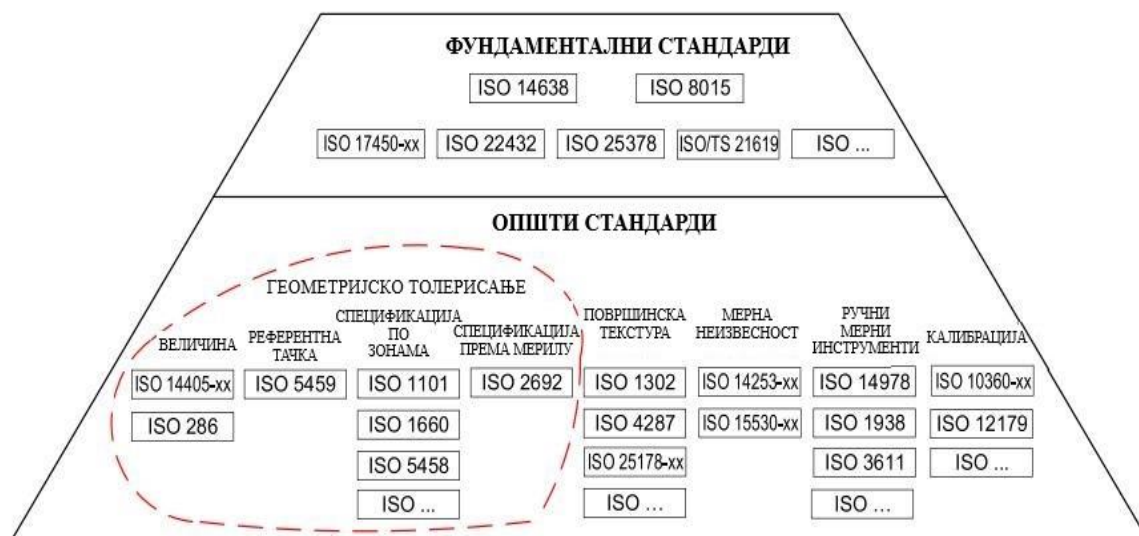
Врх пирамиде заузимају фундаментални стандарди ГСП:

- Концепт и мастерплан ГСП – *ISO 14638* и
- Основни принципи – Појмови, принципи и правила ГСП – *ISO 8015*.

Исти ниво обухвата и друге основне стандарде који успостављају концептуалну основу за *ISO* ГПС систем развоја и примене:

- Општи појмови ГСП – *ISO 17450*,
- Облици који се користе за спецификацију и верификацију ГСП – *ISO 22432*,
- Карактеристике и услови — Дефиниције ГСП – *ISO 25378* и

- Врсте докумената ГСП – *ISO/TS 21619*.



Слика 6.1 Хијерархија *ISO* ГСП стандарда [79]

Испод фундаменталних налазе се општи стандарди који се примењују на одабране сегменте у ГСП матрици:

- Димензионално прописивање толеранција – *ISO 14405*,
- Геометријске толеранције – Референце и референтни системи – *ISO 5459*,
- Геометријско прописивање толеранција – Толеранције облика, орјентације, положаја и бацања – *ISO 1101*,
- Геометријско прописивање толеранција – Захтев за максимум материјала (*MMR*), захтев за минимум материјала (*LMR*) и захтев реципроцитета (*RPR*) – *ISO 2692*,
- Означавање површинске текстуре – *ISO 1302*,
- Контрола мерењем радних комада и мерне опреме – *ISO 14253*,
- Општи појмови и захтеви за ГПС опрему за мерење – *ISO 14978* i
- Испитивање прихватљивости и поновне верификације за машине за мерење координата – *ISO 10360*.

6.1.2 Геометријско димензионисање и толерисање

Све геометријске толеранције одређене су стандардним скупом симбола на цртежу. Геометријско димензионисање и толерисање (*GD&T*) је део процеса пројектовања и развијено је са циљем да пружи информације о дизајну, као и да помогне активностима у процесу производње. Софтверске апликације које се односе на ове активности користе се у циљу правилног претварања и интерпретације информација о геометријским толеранцијама (*GT*) на основу *ASME* и *ISO* стандарда. Према *ASME* *P14.5M GD&T* представља математички језик који се користи за одређивање прихватљивих одступања за делове или склопове [80]. *GD&T* карактеристике су

дефинисане стандардом *ISO 1101* и укратко су описане у табели 6.1. Дати су симболи толеранције, тип и назив, потреба за референтним елементом и кратак опис.

Табела 6.1 Симболи *GD&T - ISO 1101*

<i>GD&T</i> симбол	Тип толер.	Назив толеранције	Реф. елемент	Опис
	Облик	Правост	Не	Контролише правост неке карактеристике (линије, осе) у односу на њену идеалну форму
		Равност	Не	Контролише равност површине у односу на њену идеалну форму
		Кружност	Не	Контролише облик кружне (ротационе) површине у односу на њену идеалну форму
		Цилиндричност	Не	Контролише цилиндричност неке ротационе површине
		Облик линије	Не	Контролише величину и облик карактеристике слободног облика – профила (линије)
		Облик површине	Не	Контролише облик неке површине
	Правцац	Паралелност	Да	Контролише паралелни положај површине у односу на референтни елемент (површину)
		Управност	Да	Контролише управни положај површине у односу на референтни елемент (површину)
		Угао нагиба	Да	Контролише угао између две равни, површине или линије које нису међусобно управне или паралелне
	Место	Локација	Да и не	Контролише локацију и оријентацију карактеристике у односу на њен референтни оквир
		Концентричност и коаксијалност	Да	Контролише положај неког детаља у односи на други (референтни елемент)
		Симетричност	Да	Контролише симетрију две површине око централног референтног елемента - осе
	Тачност обртања	Кружност и обртање	Да	Контролише кружност и коаксијалност сваког кружног сегмента површине независно од коаксијалног референтног елемента
		Равност и кружност обртања (укупно)	Да	Контролише кружност, равност, коаксијалност и конус површине око коаксијалног референтног елемента

6.1.3 Храпавост

Реалне инжењерске површине карактерише одређен степен одступања облика од номиналне (идеалне) површине. Степен одступања, односно несавршености површине, дефинише се на макрогеометријском и микрогеометријском нивоу. Микрогеометријске неравнине површина формирају валовитост и храпавост.

Према *ISO 4287* површинска храпавост обухвата површинске неправилности са релативно малим размацима који обично укључују неправилности настале услед начина производње који се користи и/или других утицаја. Другим речима под храпавошћу се подразумевају неравнине чије је међусобно растојање релативно мало, а висине могу бити веома различите. Најчешће примењивани параметри храпавости (слике 6.2 и 6.3) су:

- Средње аритметичко одступање профила од средње линије (или средње одступање профила) (R_a) које представља апсолутна одступања свих тачака профила од средње линије:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \text{ или приближно:}$$

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |Z(x)_i|}{n}$$

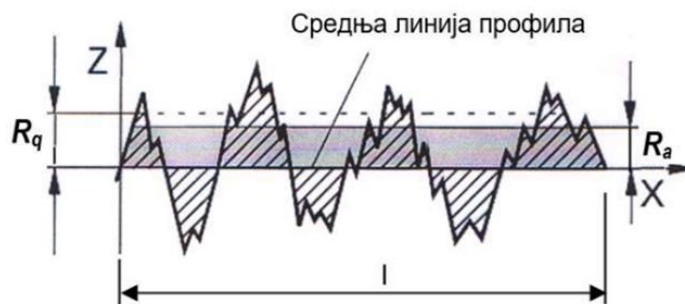
- Средње квадратно одступање мереног профила (R_q) представља вредност средњег корена одабране вредности $Z(x)$ на дужини узорковања (l):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$$

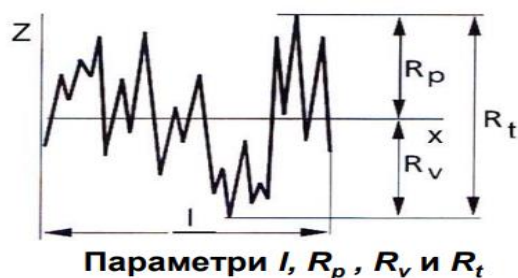
- Средња висина неравнина (R_z), је једнака збиру аритметичке средине апсолутних вредности висине пет највиших врхова и аритметичке средине апсолутних вредности пет највећих дубина профила на дужини узорковања (l):

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 R_{pi} - \sum_{i=1}^5 R_{vi} \right)$$

- Највећа висина неравнина (R_t или R_{max}) је величина висине између две праве, паралелних са средњом линијом профила, које тангирају највећу односно најнижу тачку профила на дужини узорковања.
- Највећа висина врха профила – (R_p) на дужини узорковања (l) представља растојање од средње линије профила до највишег врха.
- Највећа дубина профила – (R_v) на дужини узорковања (l) представља растојање од средње линије профила до најнижег дна.
- Средња линија профила (m) је она линија која има облик геометријског профила и сече ефективни профил тако да је, у границама дужине узорковања (l) сума квадрата одступања тачака ефективног профила (кота Z) до ове линије најмања.



Слика 6.2 Параметри храпавости површине



Слика 6.3 Остали параметри храпавости

Стандардом *ISO 1302* је дефинисано 12 класа (степен) храпавости површина у зависности од средњег аритметичког одступања R_a . Оне су на цртежима означаване словном и бројчаном ознаком, почев од N1 до N12, а сада се означавају вредностима R_a .

6.2 Савремени системи за мерење (СММ, скенери и уређаји за мерење храпавости)

Савремени системи за мерење играју кључну улогу у индустрији, производњи и истраживању, обезбеђујући прецизне и поуздане податке о димензијама, облицима и површинској храпавости материјала и компоненти. Координатне мерне машине (СММ), скенери и уређаји за мерење храпавости представљају софистициране уређаје који омогућавају аутоматско мерење физичких карактеристика објеката користећи нумеричке контроле и савремене софтверске алате. Ове машине комбинују механичке, електронске и рачунске компоненте, чиме се постиже висока тачност и поновљивост мерења.

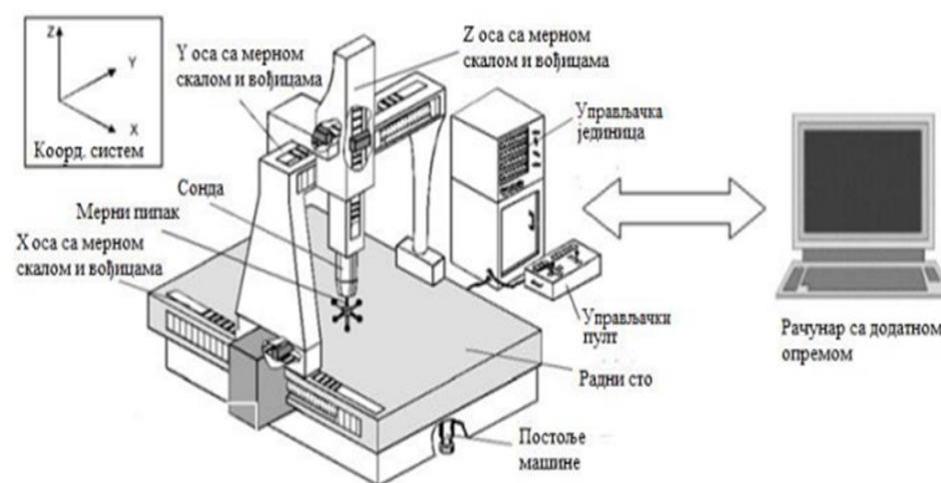
У складу са развојем технологије, ови системи постају све софистициранији, са интеграцијом софтверских решења која омогућавају анализу података у реалном времену, као и имплементацију аутоматизованих процеса мерења. Разумевање и коришћење ових савремених технологија кључно је за постизање конкурентске предности у савременој индустрији.

6.2.1 Координатне мерне машине (СММ)

Координатна метрологија представља једну од кључних техника у производњи и реверзном инжењерству. Координатна мерења се све више примењују у разним гранама индустрије, као што су аутомобилска индустрија, бродоградња и ваздухопловна индустрија, а посебно се све више примењује за мерење великих радних комада. Иако традиционална машина за координатно мерење (СММ) има веома високу тачност, она има слабу флексибилност и захтева строге услове околине, што је најчешће чини неподесном за мерење на лицу места. Због тога се у последње две деценије појавило неколико врста преносивих техника координатног мерења, укључујући ласерске скенере, уређаје засноване на фотограмetriји и тако даље [81].

Примарни делови тродимензионалних мерних инструмената (слика 6.4) познатих и као координатне мерне машине су управљачка јединица, постоље и клизачи, серво мотори,

систем сонди, електронске вођице, софтвер и рачунарски хардвер са додатном опремом. У зависности од намене и тога где се користе, *СММ* долазе у различитим облицима. Глава повезана са сондом, која се креће по X , Y и Z осе, ротира за 360 степени на својој сопственој осе и тако омогућава разноврсност приликом мерења. Са компјутерском контролом, глава са сондом се аутоматски води и тачка се аутоматски читава када дође у контакт са делом. Димензиона мерења се врше креирањем геометрије са добијеним тачкама. Мерења се могу вршити са или без *CAD* података. У случајевима где је мерење планирано са *CAD* подацима, овај план се може аутоматски поновити. *СММ* машине имају веома високу прецизност тако да се мерења могу извршити са прецизношћу од 1 микрона или чак мање [82, 83].



Слика 6.4 Принцип рада координатне мерне машине [84]

У свету мерења постоје две врсте координатних система. Први је машински координатни систем. Овде се осе X , Y и Z односе на кретања главе са сондом. Када се посматра са предње стране машине, X оса иде с лева на десно, Y оса иде од напред ка назад док Z оса иде горе-доле, вертикално у односу на друге две. Други координатни систем се назива координатни систем делова где се све три осе односе на карактеристике радног комада.

Пре увођења рачунарског софтвера за координатна мерења, делови су углавном били физички поравнати паралелно са осовинама машине тако да су машина и координатни системи делова били паралелни један са другим. Ова метода је одузимала много времена и није давала довољно прецизне резултате. У случајевима где је део био сложене контуре или округао а не правоугаоног или квадратног облика, било је скоро немогуће извршити тачно мерење [85].

Уз тачност и прецизност *СММ* –а, софтвер који је специјализован за мерење је кључан када се прецизно прегледају многе различите врсте компоненти. Оптимални софтверски модули могу анализирати резултате мерења да би документовали, представили резултате и архивирали податке у графичком или табеларном облику. На пример, израчунавање да ли је сложени облик произведене компоненте исправан на основу тачака података екстрахованих током мерења захтева употребу математичких

формула високог нивоа и софистицираних алгоритама. Такође је од виталног значаја тражити *СММ* са софтвером који може да обради ове сложене прорачуне и чак може да комбинује интуитивно програмирање засновано на иконама са могућношћу увоза изворних *CAD* модела директно из софтвера за пројектовање, тако да се цео циклус развоја производа од дизајна до израде прототипа може повезати [86].

Координатне мерне машине обично долазе у четири различита типа:

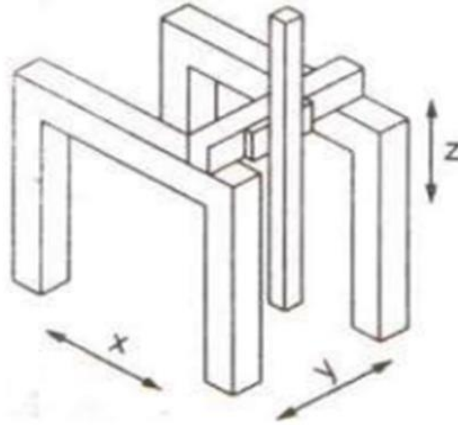
- Мосни тип *СММ*,
- Портални тип *СММ*,
- Конзолни тип *СММ* и
- *СММ* са хоризонталном руком.

Мосни тип координатне мерне машине (слика 6.5) представља једну од најпопуларнијих и најчешће коришћених машина овог типа. Типична 3D "мост" *СММ* машина омогућава кретање мерне сонде дуж све три осе, *X*, *Y* и *Z*, које су ортогоналне једна према другој у тродимензионалном Декартовом координатном систему. Свака оса има сензор који прати положај сонде на тој оси, обично са микрометарском прецизношћу. Када сонда дође у контакт (или се на други начин открије одређена локација) на објекту, машина узоркује три сензора положаја, мерећи тако локацију једне тачке на површини објекта. Овај процес се понавља по потреби, померајући сонду сваки пут, да би се произвео "облак тачака" који описује циљане површине. Због своје једноставности израде и структуре која је такође једноставна, мосни типови *СММ*-а постали су изузетно популарни. Ове машине имају ниску цену израде и велику способност да одрже тачност и поновљивост током дужег периода коришћења. Већина машина мосног типа је заснована на прецизној гранитној плочи са два носача који подржавају носач *X*-осе. Суштински, покреће се само једна страна моста док је друга страна слободна. 95 % свих машина овог типа ради на ваздушним лежајевима како би се омогућило кретање без трења и додатно смањила механичка интеракција [87].



Слика 6.5 Мосни тип координатне мерне машине [88]

Код порталних типова *СММ*-а (слика 6.6), носач главе са сондом је чврсто постављен на два носача која имају могућност да клизе преко постоља. Кретања по X , Y и Z - оси изводе се на начин који је такође приказан на овој слици. Конструкција порталног типа омогућава оператеру да увек буде у близини области инспекције а ове машине су посебно погодне за веома велике делове који се мере [89].



Слика 6.6 Портални тип координатне мерне машине [90]

Конзолна *СММ* машина (слика 6.7) и њен дизајн је првобитно представљена од стране *Ferranti*-ја у Шкотској 1970-их и до данас се производе у мањем броју у односу на остале типове ових машина [89]. Конзолни *СММ* се генерално користе за мерење релативно малих делова, обезбеђујући отворен приступ оператеру са све три стране. За разлику од мосног типа *СММ*-а, глава је причвршћена само на једну страну круте базе. Велика потпорна база стуба у комбинацији са малом тежином значи да се конзолни *СММ* брзо померају. Због високог нивоа тачности и ниске мерне несигурности, конзолни *СММ* се углавном користе за мерење контролних алата и сл [91]. Предности конзолних *СММ* –а су:

- Веома прецизне,
- Погодне су за мање делове и
- Приступ са три стране олакшава аутоматско или ручно постављање делова.

Недостаци конзолних *СММ* –а су [92]:

- Могу бити скупе
- Имају фиксну запремину мерења
- Део мора бити доведен у систем што представља недостатак преносивости
- Осетљивост на вибрације и коришћење само у метролошкој лабораторији
- Захтева подешавања за сваки прегледани део
- Комплексне за рад и потребни су квалификовани радници за програмирање машина.

Као што име говори, *СММ* са хоризонталном руком има своје мерне сонде постављене хоризонтално, за разлику од других машина које имају стандардну вертикалну

конфигурацију. Пошто су њихове мерне сонде широко растегнуте, погодне су за мерење веома дугих, танких објеката као што су метални лимови са геометријама које је тешко достићи конвенционалним *СММ* -ом са вертикалном конфигурацијом [94].



Слика 6.7 Конзолни тип координатне мерне машине [93]

СММ са хоризонталном руком (слика 6.8) се сада већ традиционално користи у области аутомобилске индустрије, највише код мерења каросерије аутомобила. Међутим, бројне јединствене предности оваквих система значе да се широко користе у различитим секторима где се друга мерна решења не показују најпрецизније. Попут *СММ*-а за мосног и порталног типа, *СММ* -ови са хоризонталном руком пружа тачне и релевантне податке како у контролној соби тако и на монтажној траци [95]. У аутомобилској индустрији, на пример, две руке се могу упарити за мерење обе стране оквира возила истовремено док се креће низ монтажну траку. Ово се ради синхронизацијом обе машине на исти (аутомобилски) координатни систем. Због свог дизајна, руке су у стању да досегну елементе унутар возила који би били недоступни мосном типу *СММ*-а. Иако су руке на супротним странама оквира, њихова синхронизација са координатним системом возила омогућава да подаци које прикупљају буду повезани са једним координатним системом [96].



Слика 6.8 Координатна мерна машина са хоризонталном руком [97]

6.2.2 3D скенери

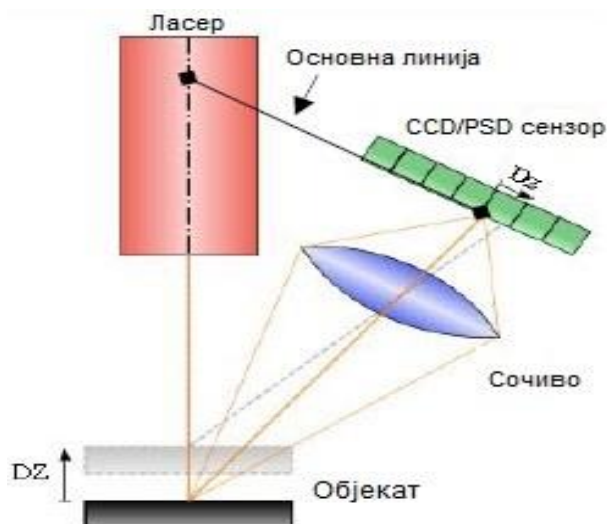
3D скенирање представља бесконтактну технику мерења коришћењем 3D скенера који снимају облике објеката. Након 3D скенирања, праве се 3D датотеке, које се могу сачувати, уређивати и касније штампати помоћу 3D штампача. Постоје више различитих метода 3D скенирања које су засноване на различитим принципима рада. Свака од ових метода има своје предности, недостатке и разлике у цени. 3D скенирање је компатибилно са CAD софтверима и са 3D штампањем. При анализирању процеса реверзног инжењерства, 3D скенирање представља један од примарних корака за добијање информација о дизајну објеката. Једна од највећих препрека које се могу наћи у процесу претварања физичких објеката у дигиталне је велика некомпатибилност између два различита типа 3D модела: чврстих тела и мрежа. 3D скенер даје мрежу, а не конструктивни "чврсти" модел и зато мреже морају бити реверзно пројектоване да би се могле уређивати [98]. Зависно од примене, објекта који се дигитализује и потребних захтева у погледу прецизности модела, користе се одговарајући типови 3D скенера [99].

Бесконтактни скенери као што су ласерски и оптички, фотограметријски, за детекцију светлости и домета као и технике засноване на слици, с друге стране, снимају геометрију без физичког контакта [100].

Постоји велики број технологија 3D скенирања, а неке од најважнијих су:

- Технологија 3D скенирања ласерске триангулације,
- Технологија 3D скенирања структурираног светла,
- Фотограметријска технологија,
- Технологија *Time-of-Flight* (ласерско пулсно 3D скенирање) и
- Компјутеризована томографија (СТ скенирање).

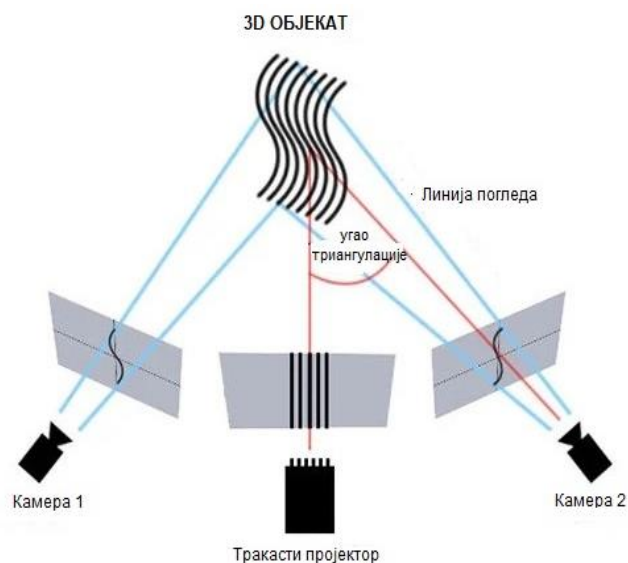
Триангулациони 3D ласерски скенери су активни скенери који користе ласерско светло за испитивање површине. Што се тиче 3D ласерског скенера, триангулациони ласер шаље светлост на субјекат и користи камеру у циљу претраге локације ласерске тачке. У зависности од тога колико далеко ласер удари у површину, ласерска тачка се у видном пољу камере појављује на различитим местима. Ова метода се назива триангулација јер ласерски емитер, камера и ласерска тачка формирају троугао (слика 6.9). Позната је дужина једне стране троугла, растојање између камере и ласерског емитера. Познат је и упадни угла ласерског емитера. Угао камере се може одредити посматрањем локације ласерске тачке у видном пољу камере. На основу ових информација у потпуности се одређује величина и облик троугла и даје локација положаја ласерске тачке троугла. У већини случајева, ласерски сноп уместо једне ласерске тачке, прелази преко објекта да би се убрзао процес аквизиције. Национални истраживачки савет Канаде био је међу првим институтима који су 1978. године развили технологију ласерског скенирања засновану на триангулацији [101].



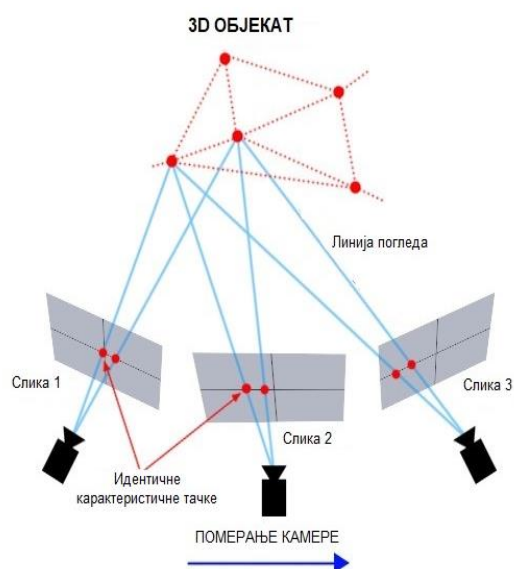
Слика 6.9 Метода триангулације [102]

3D скенери са структурираним светлом пројектују образац светлости на субјекат и откривају деформацију шаре на субјекту. Узорак може бити једнодимензионалан или дводимензионалан. Пример једнодимензионалног узорка је линија. Линија се пројектује на субјект помоћу *LCD* пројектора или ласера. Камера, благо померена од пројектора, снима облик линије под углом (слика 6.10) и техника слична принципу триангулације се користи за израчунавање удаљености сваке тачке на линији. У случају једнолинијског узорка, линија се помера преко видног поља да би се прикупиле информације о удаљености једну по једну траку [103].

Фотограметрија је техника мерења за издвајање геометрије, померања и деформације структура помоћу дигиталних слика или фотографија. Концепт фотограметрије повезан је са концептом перспективе и сеже до Леонарда да Винчија. У раним данима, фотограметрија се користила за ваздушне и земаљске примене углавном мотивисане војним извиђањем. Са напретком у дигиталним камерама и могућношћу куповине јефтених камера високе резолуције, апликације су се прошириле и укључиле друге гране науке као што су машинство и грађевинарство. Истраживачи су користили термине као што су фотограметрија блиског домета, видеограметрија, динамичка фотограметрија, компјутерски вид, машински вид, роботски вид, који су се односили на ову технику мерења. Дводимензионална (*2D*) фотограметрија користи једну фиксну камеру и ограничена је на мерење деформације у равни на површини равног објекта. Ако је испитни објекат закривљен или се након оптерећења јављају тродимензионалне (*3D*) деформације, *2D* фотограметрија генерално више неће моћи да пружи тачне резултате. Ране примене фотограметрије биле су ограничене на издвајање померања крутог тела објекта или дискретних тачака на објекту, а не на прикупљање информација у целом пољу [105, 106]. На слици 6.11 приказан је принцип рада фотограметријске методе.



Слика 6.10 Скенер са структурираним светлом [104]



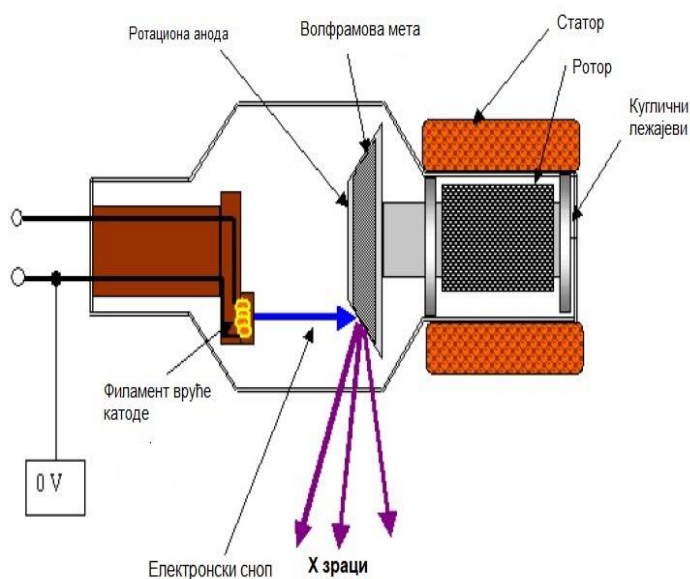
Слика 6.11 Принцип рада фотограметрије [107]

Ласерски пулсни скенери (енг. *Time-of-Flight* скенери), засновани су на врло једноставном концепту: брзина светлости је позната веома прецизно, тако да ако се зна колико дуго је ласерском зраку потребно да стигне до објекта и врати се назад до сензора, зна се колико је удаљен тај објекат (слика 6.12). Ови системи користе електронска кола која су прецизна до пикосекунди за веома прецизно мерење времена које је потребно милионима ласерских импулса да се врате до сензора и израчунавају растојање. Ротацијом ласера и сензора (обично преко огледала), скенер може скенирати до пуних 360 степени око себе.

Ласерски системи са фазним померањем су још један тип технологије 3D скенера без светла, и концептуално раде слично системима заснованим на импулсима. Поред пулсирања ласера, ови системи такође модулирају снагу ласерског зрака, а скенер упоређује фазу ласера који се шаље и затим се враћа сензору [108].

Слика 6.12 Ласерски пулсни (*Time of Flight*) скенери [109]

У компјутеризованој томографији, мерења преноса рендгенских зрака се снимају на рачунарском меморијском уређају, а не на филму, а примењује се софистицирани математички алгоритам [110]. *СТ* скенирање (слика 6.13), такође познато као *3D* - компјутерска томографија, функционише тако што обрађује вишеструке рендгенске слике да би се добио тродимензионално тачан *3D* модел објекта који се скенира.

Слика 6.13 Принцип рада *СТ* скенера [112]

Индустријски *СТ* скенери посматрају све стране објекта и користе математичке методе за реконструкцију запремине. Ова резултујућа *3D* запремина нуди унутрашњи поглед који ниједна друга технологија не пружа. Али само *СТ* скенирање није довољно. Само у случају комбинације са правим софтверским алатима за анализу и визуализацију добија се систем који се може изузетно продуктивно користити у различитим индустријским апликацијама. Различите врсте софтвера нуде функције које далеко превазилазе могућности основне функционалности *СТ* скенера, као што су [111]:

- Аутоматско прикупљање и анализа података скенирања
- Детекција дефекта
- Функције мерења укључујући *GD&T*, *FEM* алате за мрежу.

6.2.3 Уређаји за мерење храпавости

Машинска индустрија у највећем броју случајева захтева делове који морају бити веома високог квалитета, а једна од битних карактеристика тих делова је свакако квалитет површина.

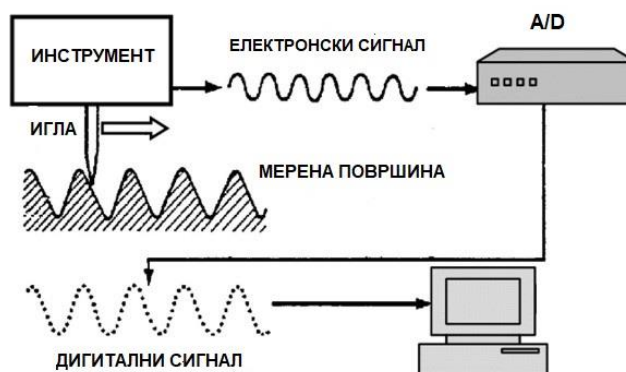
Површинска храпавост представља скуп микрогеометријских неправилности на површини дела (које су много пута мање од површине целог предмета), до којих долази неким поступком обраде или неким другим утцајима. Према степену неправилности одређује се квалитет обрађене површине који утиче на смањење трења код клизних површина, спречавање појаве концентрације напона, херметичност, отпорност на корозију и коначно естетски изглед производа [113].

Постоје бројни параметри који представљају меру храпавости профила, а један од најчешће коришћених вредности је свакако средње аритметичко одступање профила од средње линије профила R_a . R_a се мери у оквиру дужине оцењивања. Што су одступања већа, то је површина грубља а ако је вредност R_a мала, површина је глатка. R_a се израчунава у микрометрима (μm) или микроинчима (μin). Други параметар храпавости је средња висина неравнина R_z , који представља разлику између 5 највиших врхова и 5 најнижих удубљења на линији профила површине у оквиру дужине оцењивања. Такође, основни параметар храпавости површине је и максимална висина неравнина R_t или R_{max} . Још један параметар који се често користи за изражавање храпавости површине је R_q , који представља средњу квадратну девијацију профила [114].

У инструментима за мерење храпавости контактеног типа, врх игле остварује директан контакт са површином узорка. Вертикално померање игле се детектује електричним путем. Електрични сигнали пролазе кроз процес појачања и дигиталне конверзије да би се снимили. За прецизно мерење деликатних облика и храпавости са контактним тестером за површинску храпавост, радијус врха игле мора бити што мањи уз мали контактни притисак. Игле су у највећем броју случајева направљене од сафира или дијаманта и њихов полупречник врха је обично око 10 μm или мањи. Конусни облик врха игле са радијусом сматра се идеалним за иглу [115].

Принцип рада профилометра је да анализира топографију површине помоћу игле која се физички креће дуж површине да би се забележиле карактеристике површине као што је висина неравнина. Ова анализа је подржана механичком повратном спрегом која прати силу којом се игла креће преко површине узорка. Иглу контролише систем повратних информација при одређеној количини обртног момента познатог као задата тачка. Мере се промене у правцу у току праћења кретања игле преко површине чиме се реконструира површина. Профилометар са иглом ради по систему повратне спреге који физички додирује површину, а игла је веома осетљива према површини што може

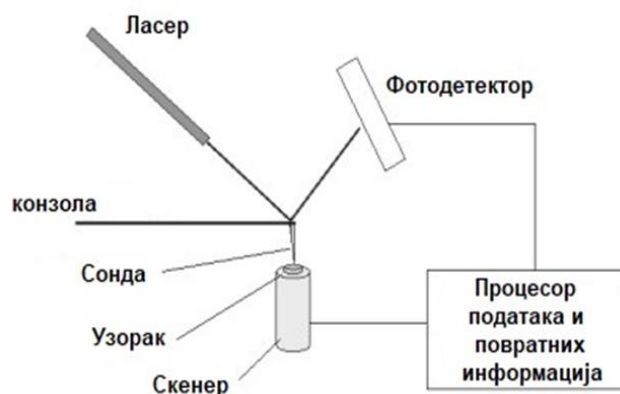
да изазове деструкцију врха [116]. На слици 6.14 приказани су основни елементи профилометра.



Слика 6.14 Принцип рада профилометра [117]

Мерење храпавости површине путем контакта је једна од најчешће коришћених метода за мерење храпавости површине. Међутим, он има своје предности и недостатке у мерењу профила храпавости површине. Предности укључују јасан профил таласа; пошто је врх игле у контакту са површином узорка добијени профил храпавости је врло јасан и представља реплику површине, такође је способан за мерења на великим удаљеностима, што није могуће у случају оптичких мерења. Недостаци мерења заснованог на контакту укључују углавном хабање врха игле које је узроковано контактом између оштрог врха игле и храпавости површине. Површина узорка ће бити изгребана због померања врха игле на површини током мерења, а мерење је ограничено на радијус врха игле. Ова метода се не користи за мерење храпавости на вискозним узорцима а такође је и веома дуготрајан процес. У почетку мерење захтева правилно позиционирање игле на одговарајућу мерну површину што је тешко у овој методи [118].

Микроскопи атомских сила (*AFM* микроскопи), се могу користити за одређивање храпавости површине и поларитета различитих типова површина које потичу од различитих врста материјала. Ова аналитичка метода омогућава истовремено снимање слика које представљају топографију и поларитет површине у молекуларној (нанометарској) резолуцији. Микроскоп атомске силе (*AFM*), такође назван микроскоп скенирајуће силе (*SFM*), развијен је 1986. године, након *STM*. Слично у раду као *STM*, *AFM* укључује скенирање помоћу игле са оштрим врхом преко површине узорка уз праћење интеракције између врха и узорка како би се омогућила реконструкција тродимензионалне топографије површине (слика 6.15). Типичан *AFM* може да обезбеди резолуције реда од 1 nm бочно и 0.07 nm вертикално и може да слика изолаторе као и проводнике. *AFM* се састоји од оштрог врха на крају флексибилне конзоле која се помера преко површине узорка помоћу пиезоелектричних актуатора [119, 120].

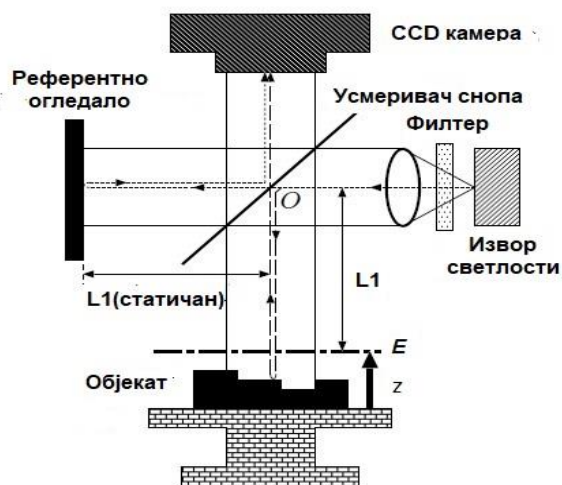
Слика 6.15 Принципа рада *AFM*-а [121]

Методе ласерског скенирања често користе принцип конфокалне ласерске скенирајуће микроскопије (*CLSM*) са отворима који одбијају светлост ван фокуса. Ово резултира побољшаним контрастом, смањеним шумом и високом аксијалном резолуцијом (оптичко сечење). Дебљина оптичког пресека се обично прилагођава дубини фокуса (таласна дужина ексцитационе светлости подељена квадратом нумеричког отвора сочива објектива). Информације (нпр. флуоресценција) из појединачних равни могу се користити за реконструкцију *3D* слике. У конфокалном ласерском скенирајућем микроскопу са тачкастим скенирањем, фокусирани ласерски зрак се скенира преко узорка, а емитована флуоресцентна светлост се снима на малој рупици испред детектора светлости, нпр. фотомултипликатора, да би се елиминисало светло ван фокуса [122].

Скатерометрија је оптичка метода за мерење и анализу храпавости површине. Ова метода се заснива на расејању светлосних таласа од површинских неправилности. Суштина скатерометрије састоји се у мерењу интензитета и угаоне дистрибуције расејане светлости. Мерење се ради у једном или два смера, у зависности од структуре површине и осветљености. Мерење храпавости површине скатерометријом се користи у два случаја. Прво, ова метода се примењује када треба мерити храпавост веома глатких површина, као што су на пример оптичке површине и површине силицијумске плочице. Друго, скатерометрија се користи када треба извршити брзу процену храпавости површине у производњи посебно током кретања радног предмета. Постоје различити начини за процену храпавости површине мерењем рефлектоване светлости од храпаве површине. То су: мерење рефлектоване светлости, мерење укупног интегрисаног расејања (*TIS*) и мерење угаоне дистрибуције расејане светлости [123].

Интерференција беле светлости представља технику у којој узорак светлих и тамних линија (интерферентних ивица) настаје као резултат разлике оптичке путање између референтног и узоркованог светла. Долазна светлост се дели унутар интерферометра, један сноп иде на унутрашњу референтну површину, а други на MEMS узорак. Након рефлексије, снопови се рекомбинују унутар интерферометра, пролазећи кроз конструктивне и деструктивне интерференције и производећи образац светлих и тамних рубова који представља топографију површине узорка који се тестира. Овај

образац је познат као интерферограм и снима га *CCD* камера високе резолуције [124]. Принцип рада интерферометра приказан је на слици 6.16.



Слика 6.16 Принцип рада интерферометра [125]

6.3 Грешке обраде глодањем

Недостатак квалитета произведених делова (геометријске тачности и храпавости површина) техникама *3D* штампе је неминован, па стога накнадна обрада произведеног дела постаје неопходна. Методе накнадне (завршне) обраде потребне су како би се осигурало да део испуњава захтеве дизајна и да добије потребан квалитет. Извођењем завршних операција обезбеђује се добра естетика, геометријска тачност, перформансе и механичка и површинска својства [126]. Неке од стандардних метода накнадне обраде укључују претходну оптимизацију параметара процеса уместо прилагођавања процеса обраде након штампе, као што је промена оријентације штампаног дела и минимизирање дебљине слоја како би се избегао „ефекат степеница“ [127]. Међутим, потребно је више напора учинити у процесу производње како би се оптимизовали параметри, повећавајући изводљивост и погодност употребе *3D* штампе. Стога су различити истраживачи увели операције накнадне машинске обраде које могу да се користе код свих врста материјала. Овакви процеси се називају техникама постпроцесирања и обезбеђују добру завршну обраду штампаног дела. Методе обухватају операције обраде као што су стругање, глодање, брушење, обрада абразивним млазом, хемијска обрада, електрохемијска обрада и ласерска обрада површине.

На тај начин настаје концепт хибридне производње. Идеја која стоји иза хибридне производње је спајање различитих процеса на истој поставци како би се постигао ефекат познат као „ $1 + 1 = 3$ “ [128]. Термин „хибридна производња“ директно је везан за интеграцију различитих процеса обраде, а његов развој је везан за захтеве и сложеност нових делова [129].

Хибридизација је једна од најважнијих техника за развој ефикасног и прилагодљивог производног процеса *3D* штампе. Овај метод комбинује две филозофије процеса производње или извора енергије за развој хибридног система. У хибридне технике

завршне обраде које се користе за побољшање квалитета површине $3D$ штампаних делова спадају хибридни систем са CNC -ом, хибридни микро- EDM систем и хибридни систем са коришћењем ласера.

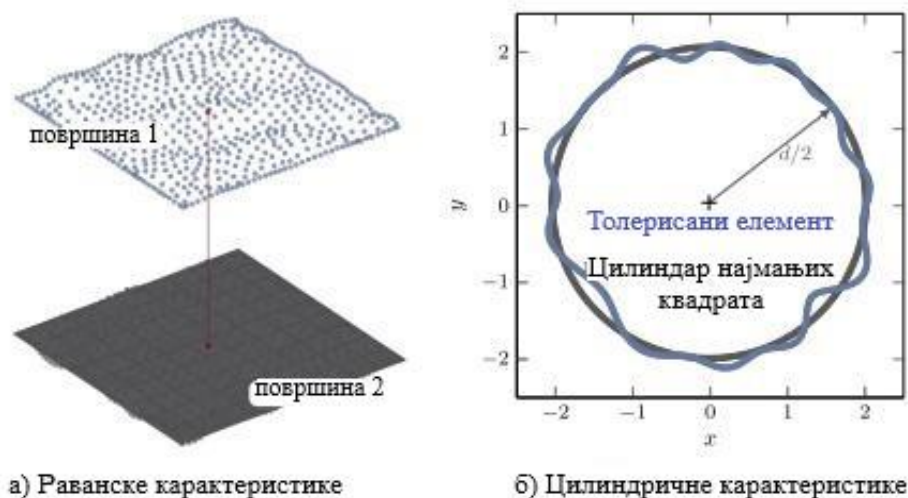
Остварљиве толеранције у FDM поступку $3D$ штампе нису погодне за високо прецизне примене [130]. Једноставно и исплативо решење за проблем квалитета $3D$ штампаних делова представља завршна операција CNC обрадом.

На основу прегледане литературе, мали број истраживача је се бавио истраживањима операција завршне обраде $3D$ штампаних полимера и само мали број радова је на тему механичке завршне обраде за ограничен број полимерних материјала.

6.3.1 Грешке линеарних димензија

Грешке линеарних димензија се могу измерити ручним мерилима, координатним мерним машинама (CMM) или индустријским $3D$ скенерима. Како CMM или скенер мере координате изабраних тачака, а не вредности дужинских растојања, резултати процесуирају накнадно софтвером за инспекцију, како би се одредило одступање од спецификоване дужинске толеранције [131].

Грешке димензија или налегања су специфициковане како би се осигурало да је стварна величина дела унутар две граничне величине. Потреба за дефинисањем граничних величина и налегања произашла је из захтева заменљивости делова у комбинацији са аксиомом непрецизности производње. Док су претходни стандарди за геометријску спецификацију производа користили максимални услов материјала за дефинисање величина, садашњи стандарди користе величине у две тачке као подразумевани критеријум [132]. Величина најмањих квадрата као глобална линеарна димензија користи се за израчунавање линеарних димензија. У том смислу, димензија између две равнанске карактеристике (равни) дефинисана је као средња вредност растојања између придружене равни најмањих квадрата једне и одговарајуће друге равнинске карактеристике (површине) (слика 6.17-а). Величина цилиндричне карактеристике је дефинисана као пречник њеног повезаног цилиндра најмањих квадрата (слика 6.17-б).



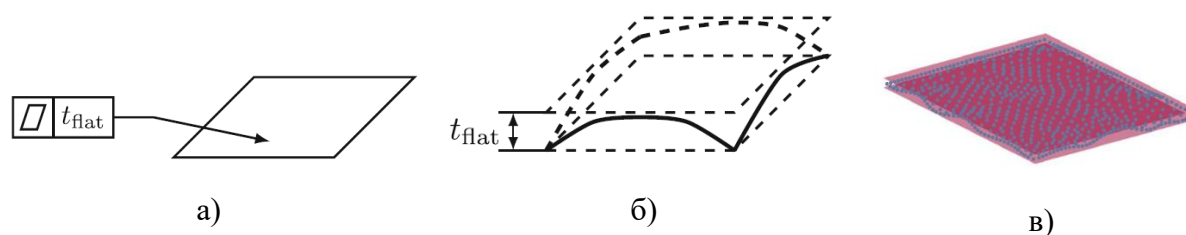
Слика 6.17 Одређивање грешке линеарне величине [133]

6.3.2 Грешке облика и положаја површина

Грешке облика и положаја површина представљају раванско или просторно одступање карактеристика (површина) од номиналних (идеалних) карактеристика. У ове грешке спадају грешке одступања од облика, правца, места и тачности обраћања (табела 6.1 из поглавља 6.1). Наведена одступања су спецификована и стандардизована прописима о *GD&T* (ISO 1101:2012). Као и код грешака линеарних димензија и грешке облика и положаја површина не могу се директно измерити помоћу *CMM* или *3D* скенера. И овде се као резултат мерења добијају координате тачака (облак тачака) као раванске карактеристике, па се облак тачака накнадно софтверски обрађују и добијају информације о одступањима. Величина најмањих квадрата користи се за израчунавање раванских карактеристика са или без поређења са референтним елементом у зависности од одступања које се израчунава.

Зона толеранције се користи да изрази и илуструје геометријске „границе“ за тип толеранције, које се захтевају одређеним спецификацијама толеранције. Толеранције облика граде зоне толеранције које нису ограничене у погледу свог правца и положаја, па не захтевају увођење референтног елемента. За разлику од овога, зоне толеранције правца, као што су паралелност и управност, су ограничене у погледу њихове положаја у односу на референтне елементе.

Толеранција облика – равности спецификује се на цртежу према слици 6.18-а. Зона толеранције равности дефинисана је простором између две паралелне равни са међусобним растојањем t_{flat} (слика 6.18-б). Тачке (облак тачака) дате карактеристике – површине, добијене поступком мерења помоћу *CMM* или скенера, распоређене су просторно (слика 6.18-в) и налазе се унутар зоне толеранције и тиме задовољавају спецификовану толеранцију. Уколико се измерене тачке налазе ван граница зоне толеранције мерена карактеристика не задовољава.

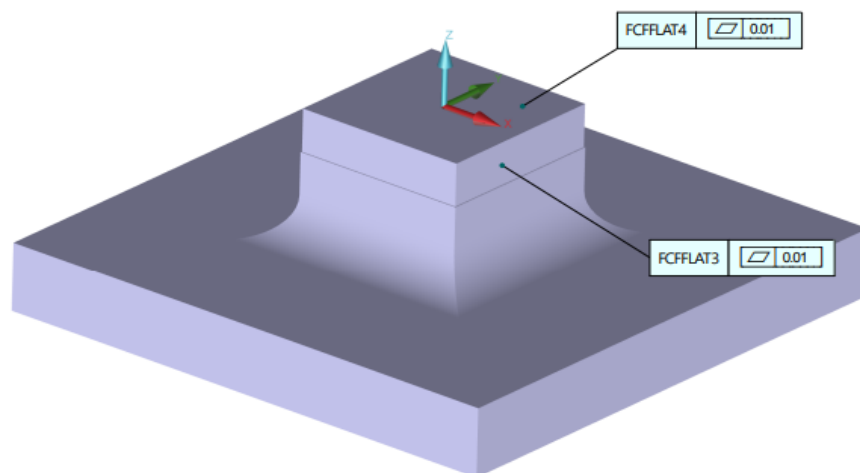


Слика 6.18 Грешка облика – равности [133]

Како се добијени (измерени) облак тачака процесира одређеним софтвером, у истом се задаје дозвољено одступање а као резултат добија извештај мерења који показује да ли је грешка обраде унутар или ван спецификованих граница (слика 6.19) односно да ли грешка обраде задовољава спецификоване захтеве или не.

На слици 6.20-а приказана је грешка облика – цилиндричности задата цртежом. Зону толеранције ограничавају два цилиндра (слика 6.20-б) са међусобним растојањем t_{cylind} . На слици 6.20-в приказани су најмањи и највећи измерени пречник цилиндра толерисане карактеристике као и софтвером, методом најмањих квадрата, добијен

измерени полупречник r . Ако се облак тачака измерене површине налази унутар зоне толеранције грешка задовољава спецификоване захтеве.



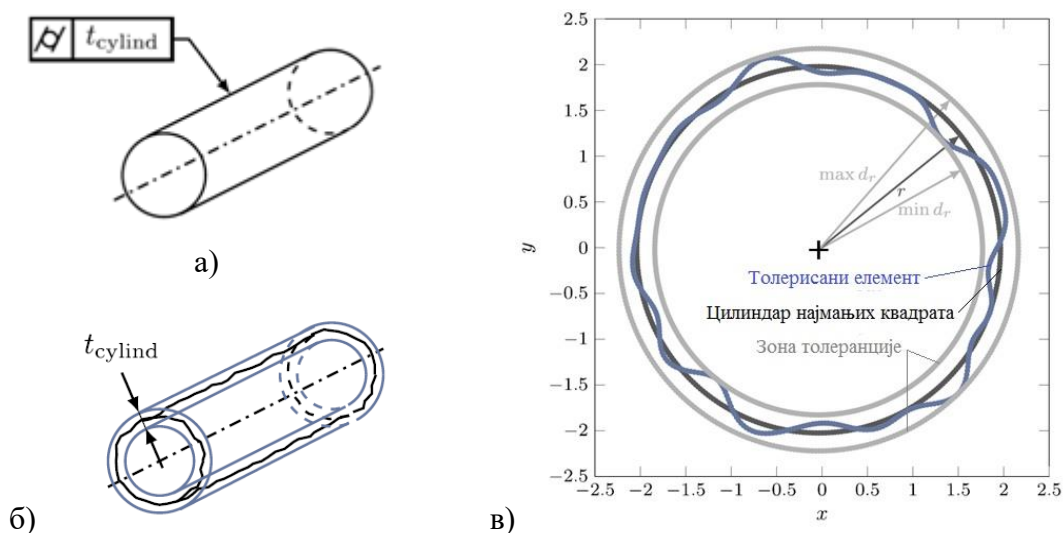
FCFLAT3		MM				0.01	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
PLN4	0.000	0.010		0.104	0.104	0.094	

FCFLAT4		MM				0.01	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
PLN5	0.000	0.010		0.004	0.004	0.000	

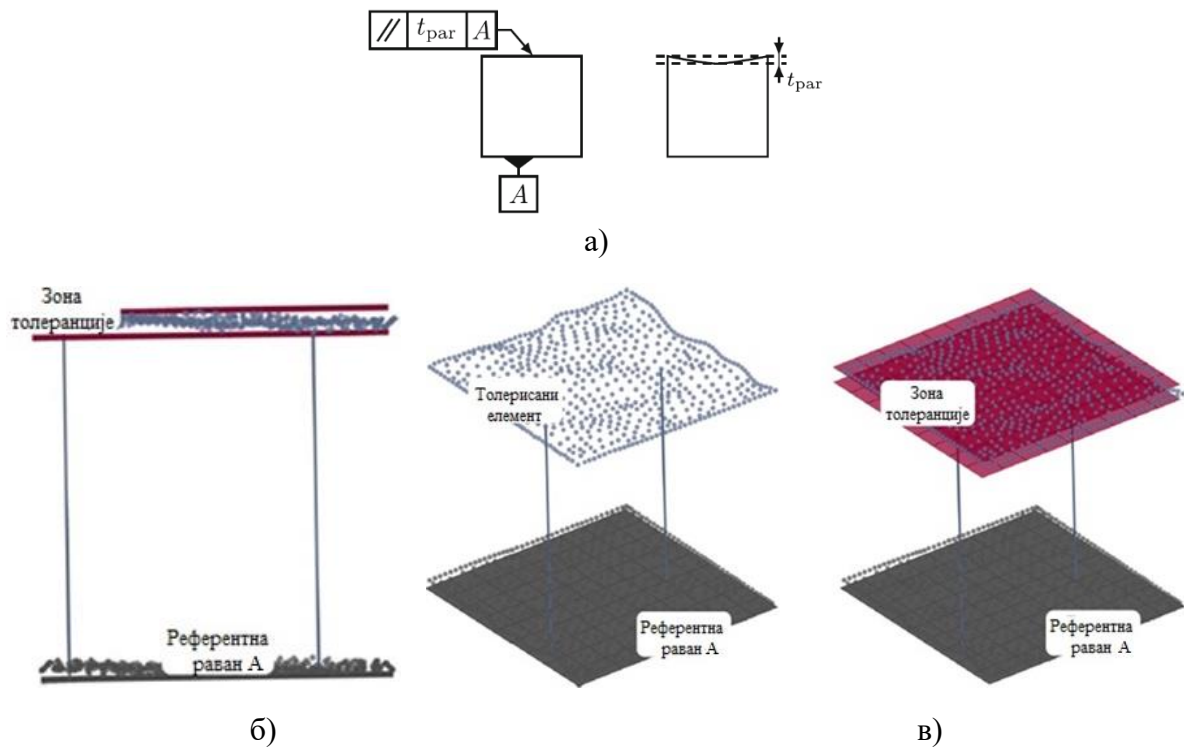
Слика 6.19 Извештај мерења грешке равности

Мерење грешке положаја захтева спецификовање референтног елемента. Референтни елемент може се спецификовати преко карактеристика равни, површине или линије (ивице).

На слици 6.21-а приказан је цртеж грешке положаја – паралелности. Зону толеранције ограничавају две површине са међусобним растојањем t_{par} у односу на референтну раван А. Слика 6.21-б приказује положај толерисане карактеристике (елемента) и зону толеранције у односу на референтну раван А, док је на слици 6.21-в приказан пример измерених тачака у односу на исте.

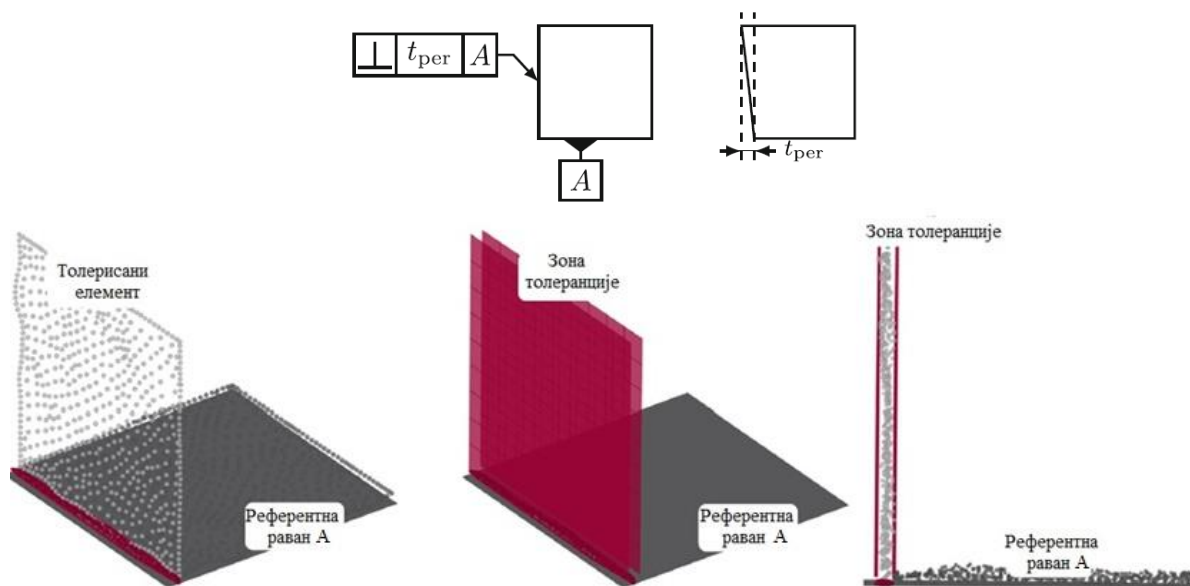


Слика 6.20 Грешка положаја - цилиндричности [133]

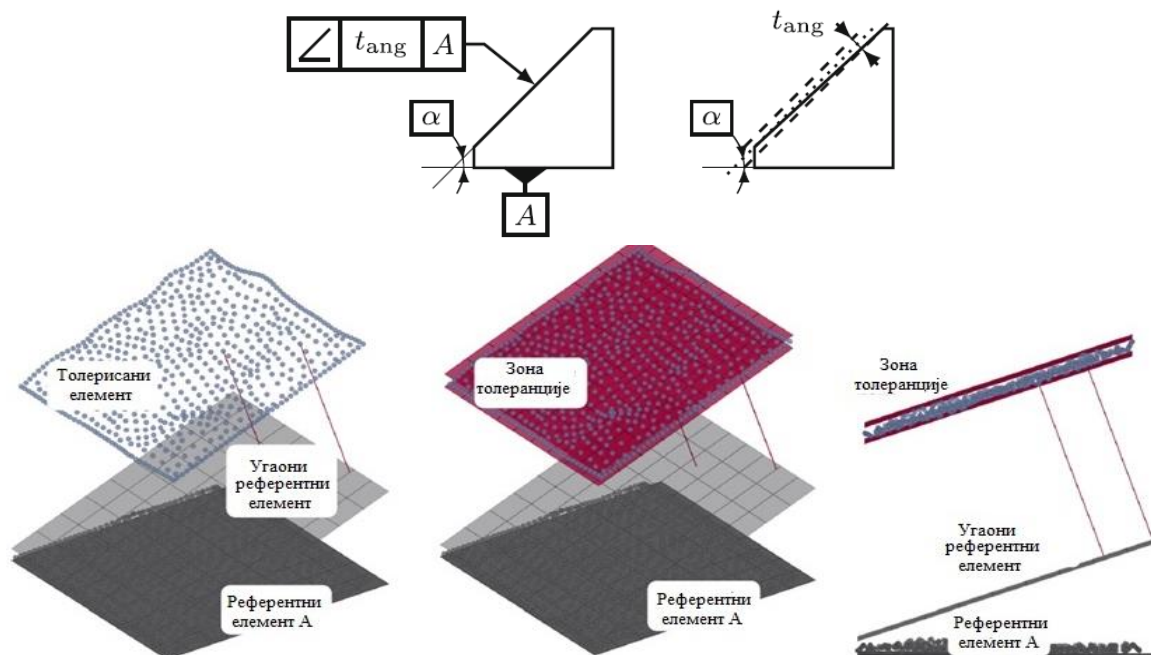


Слика 6.21 Грешка паралелности и зона толеранције [131]

На слици 6.22 приказана је грешка положаја – управности, док је на слици 6.23 приказана грешка положаја – угловности. Дати су прикази техничког цртежа, толерисани и референти елементи, зоне толеранције и примери измерених облака тачака.

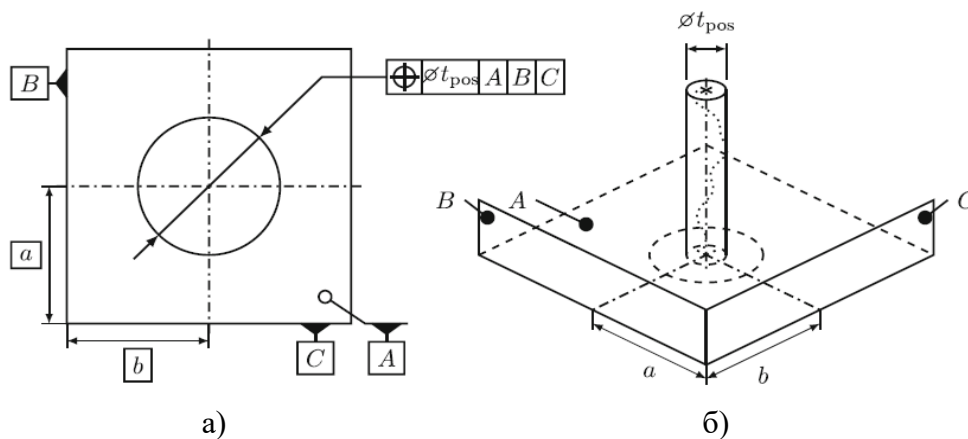


Слика 6.22 Грешка положаја - управности [131]



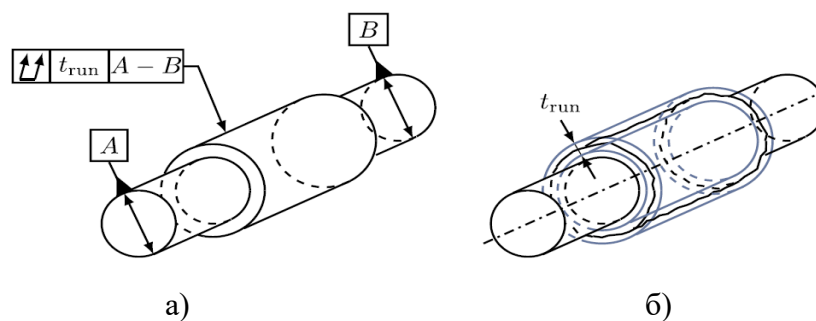
Слика 6.23 Грешка положаја - угловности [131]

Грешке – толеранције места такође захтевају спецификовање референтних елемената. Пример одступања од места – локације дат је на слици 6.24. Цртеж са спецификованом толеранцијом дат је на слици 6.24-а. Измерени положај осе цилиндра, с обзиром на спецификацију, треба да се нађе унутар цилиндра пречника ϕt_{pos} у односу на референтне карактеристике (елементе) А, В и С, како би грешка задовољавала спецификацију толеранције (слика 6.24-б).



Слика 6.24 Грешка места - локације осе [131]

У случају грешке обртања цртеж спецификује толеранцију према слици 6.25-а. Зона толеранције трун задата је преко разлике пречника два коаксијална цилиндра А и В. Да би измерена грешка била у границама толеранције измерена површина би се налазила унутар зоне. На слици 6.25-б приказан је измерени део са грешком обртања.



Слика 6.25 Грешка тачности обртања[131]

6.3.3 Грешке површинске храпавости

Када се говори о грешкама површинске храпавости, посебно у процесима обраде, храпавост представља једну од кључних карактеристика квалитета површине. Грешке храпавости могу настати из више разлога, укључујући [134]:

- Неодговарајуће алате – Коришћење неприкладног алата или алата у лошем стању (нпр. похабан алат) може довести до неједнаког и грубог завршног слоја. Код глодања или стругања, алат мора бити у оптималном стању како би се постигла глатка и квалитетна завршна обрада,
- Лоши параметри обраде – Брзина резања, дубина резања, или брзина помоћног кретања могу значајно утицати на храпавост. Избор лоших параметара може довести до превелике храпавости или чак оштећења површине,
- Вибрације током обраде – Нежељене вибрације машине или радног комада могу изазвати неуједначену површину. Ово се често дешава када машина није стабилна или се користи неадекватан држач алата,
- Неправилно хлађење – Недостатак адекватног хлађења може довести до прегревања алата и материјала, што резултира лошом завршном обрадом. Прекомерна топлота може деформисати материјал и повећати храпавост,
- Грешке у постављању радног комада – Ако радни комад није правилно учвршћен или постављен, то може изазвати лоше резултате у обради, укључујући повећану храпавост и
- Материјал радног комада – Различити материјали имају различите карактеристике обраде. На пример, мекши материјали се могу лакше деформисати, док тврћи материјали захтевају прецизнији приступ обради.

Разумевање узрока ових грешака може помоћи у њиховом смањењу, чиме се постиже бољи квалитет површине.

6.4 Триболошке карактеристике делова добијених 3D штампом

Трибологија се дефинише као наука и технологија интеракције површина при релативном кретању. Укључује проучавање и примену принципа трења, хабања и подмазивања. Трибологија као појава реализује се хиљадама година уназад. Од 1966. када је објављен добро познати „Jost извештај“, реч „трибологија“ се широко користи и истраживања у овој области су у великој мери добила на значају. Трибологија је

постала мултидисциплинарна област која је повезана са материјалима, хемијом, физиком, па чак и биологијом [135].

Трење се дефинише као отпор релативном кретању између два контактна тела. Сила трења је независна од величине додирних површина (односно, веома мало зависи) и директно је пропорционална примењеном оптерећењу. Сила трења се приписује различитим физичким, металуршким и топографским својствима површина материјала у контакту [136].

Хабање представља процес губитка материјала са контактних слојева трибо-механичких система. Када се говори о процесу хабања, у зони контакта свих врста, прате се и идентификују све промене које настају на оба чврста елемента. Постоји неколико механизма помоћу којих долази до хабања. Површина може доживети хабање због једног или више ових механизма истовремено. Подела хабања по врстама врши се и према условима у којима се процес хабања развија, па се тако према врсти релативног кретања дели на хабање при котрљању, хабање при трењу итд. Хабање се може класификовати према врсти механизма хабања и то на неколико категорија [137,138]:

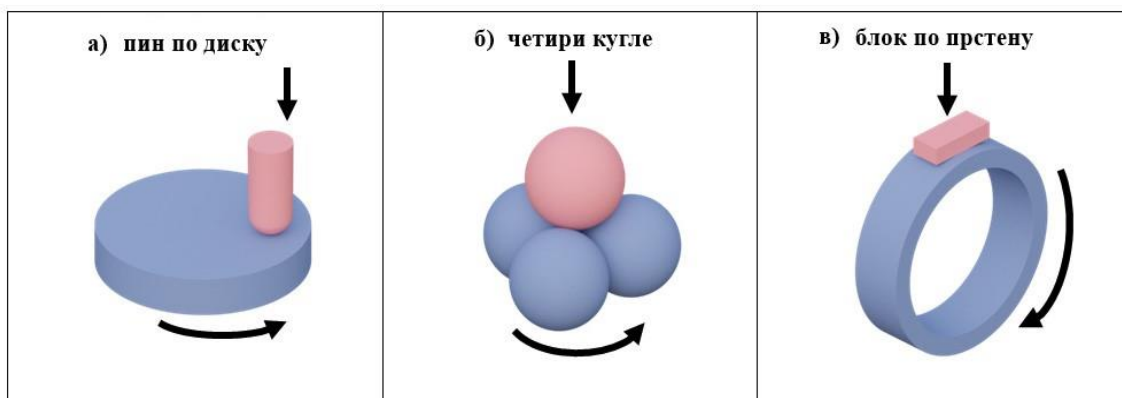
- Адхезивно хабање,
- Абразивно хабање,
- Заморно хабање,
- Корозивно хабање,
- Ерозионо хабање,
- Оксидационо хабање,
- Кавитационо хабање и
- Вибрационо хабање.

Подмазивање представља један од најчешће коришћених начина за раздвајање две клизне површине како би се у што већој мери смањило хабање и трење код трибомеханичких система. Подмазивањем се такође обављају и друге функције, као што је одношење топлоте и загађивача. Мазива су често течности, које се обично састоје од уља и додатих хемикалија, које су познатије као адитиви, који помажу уљима да боље обављају одређене функције. Основна премиса течног подмазивања је да, иако постоји отпор на смицање унутар течности због њеног вискозитета, тај вискозни отпор је много мањи од отпора трења током сувог клизања. Учинак подмазаног контакта је стога у великој мери одређен вискозитетом. Вискозитет представља меру отпора мазива течењу и представља однос напона смицања и брзине деформисања смицања U зависности од дебљине слоја мазива који се успоставља између површина у релативном кретању, геометрије спрегнутих површина и радних услова могу се постићи различити видови и врсте подмазивања. Основна два вида подмазивања су потпуно и непотпуно подмазивање [139].

Уређаји за мерење трења и хабања или трибометри, представљају основне мерне инструменте који се користе у већини триболошких испитивања. Прецизно одабран

трибометар може мерити све критичне карактеристике проблема трења или хабања без великих потешкоћа повезаних са експериментисањем. Насупрот томе, лоше одабран или дизајниран трибометар може дати потпуно непоуздане резултате тако да је темељно познавање карактеристика трибометара од суштинског значаја за било који програм триболошког тестирања. Сврха трибометра је да обезбеди симулацију трења и хабања у контролисаним условима. Трење и хабање су веома осетљиви на факторе као што су варијације у температури, оптерећењу или влажности, стога је неопходно обезбедити уређај где се сви ови фактори могу пажљиво контролисати и пратити. Такође постоји практична корист од олакшавања експериментисања без потешкоћа које прате студије хабања и трења које се јављају на оригиналној опреми. Не захтевају све триболошке студије примену типичних трибометара са динамичким контактом. У неким случајевима, посебно онима који се односе на фундаменталне аспекте трибологије, ови традиционални трибометри се не користе. Уместо тога, основне карактеристике трења, хабања или подмазивања симулирају се физичким процесима, за које се верује да обезбеђују експериментални модел триболошких феномена [140]. Трибометри се често помињу према специфичном контакту који симулирају или према оригиналном произвођачу опреме. У трибометрима на којима се мери сила трења или прати процес хабања једног или више елемената, контакт између два чврста елемента може бити остварен у тачки, по линији и по површини са елементима различите геометрије (слика 6.26). Постоји неколико различитих типова контакта и мерења на трибометру, а неки од најчешће коришћених су [141]:

- Пин по диску (слика 6.26-а),
- Четири кугле (слика 6.26-б) и
- Блок по прстену (слика 6.26-в)



Слика 6.26. Најчешће коришћени типови контакта при мерењу [142]

Флексибилност технологија 3D штампања омогућава производњу компоненти са триболошким својствима које се могу креирати по потреби, уз смањену зависност од основног материјала. Параметри штампања имају највећи утицај на контролу триболошких својстава. Материјал који се користи у процесу штампања такође има веома важну улогу у триболошким својствима финалних компоненти. Док за неке методе, триболошка својства произведених компоненти у великој мери зависе од параметара процеса штампања (нпр. фузија у слоју праха), за друге природа и састав

материјала има важнију улогу (нпр., производња фузионисаних филамената). Компоненте које се самоподмазују могу се произвести 3D штампањем са металним и неметалним основним материјалом. Одличан пример је процес ламинације плоча, који може да створи компоненте на бази челика са својствима самоподмазивања. Ова последња категорија отвара нове изгледе за специјалне примене које захтевају низак коефицијент трења (*COF*) и високу отпорност на хабање у контактима који нису подмазани [143].

Особине материјала који се користе у 3D штампању које су повезане са трењем, хабањем и подмазивањем називају се његовим триболошким својствима. Ова својства су кључна када се 3D штампани делови или компоненте покрећу или клизе. Састав материјала, *COF*, отпорност на хабање, хрпаваост површине, подмазивање и услови околине су главни фактори које треба узети у обзир. Различити материјали за 3D штампање имају различита триболошка својства, а елементи попут хрпавости површине и подмазивања доприносе смањењу трења и хабања. На триболошко понашање материјала такође могу утицати фактори околине.

Течна подмазивања која се примењују на термопластичне површине изложене трењу могу смањити трење као и хабање. Уља, масти и мазива на бази силикона су неки уобичајени примери течних мазива. Неки од термопластичних материјала су направљени са циљем да имају уграђена својства самоподмазивања. Самоподмазујућа термопластика користи пунила или адитивне материјале који ослобађају мазива како би створили подмазани слој између површина када се појави трење. Својства отпорности на хабање термопластичних материјала могу се подесити додавањем влакана или пунила/адитива који су отпорни на абразију током трења. Механичка својства материјала су побољшана употребом адитива попут стаклених влакана и угљеничних влакана, који смањују стопу хабања и повећавају трајност материјала као и производа.

Триболошка својства 3D штампаних делова могу се побољшавати како би ефикасније функционисали у триболошким апликацијама, посебно за мању потрошњу енергије. Смањење велике потрошње енергије у триболошким апликацијама може промовисати одрживост 3D штампаних делова у триболошким апликацијама. Избор правих материјала у 3D штама са добрим триболошким својствима може помоћи у побољшању ефикасности произведених компоненти и смањењу негативних утицаја на животну средину [144].

Разумевање триболошких својстава (трења и хабања) 3D штампаних компоненти је кључно за широко усвајање ове методе. Посебно се морају проучавати перформансе трења и хабања укључујући *COF* и стопу хабања/запремину 3D штампаних компоненти. Када је циљ прецизно мерење триболошких својстава компоненти, уобичајене методе су пин по диску (*pin-on-disc*) и кугла по диску (*ball-on-disc*) у тестовима са линеарним клизањем или ротацијом. Смањење трења и хабања 3D штампаних делова кроз триболошку процену је неопходно за дугорочну оптимизацију технологије која за циљ има практичну употребу. У пракси, конзистентна механичка

својства укључујући COF , чврстоћу на смицање и дуктилност, $3D$ штампаних делова представљају неке од предуслова за функционалну примену. Све док се квалитет површине $3D$ штампаних компоненти не може оптимизовати различитим методама, избором материјала и техником накнадне обраде, традиционалне технике се не могу заменити.

Триболошки губици су одговорни за више од 20% глобалне употребе примарне енергије. Стога је очигледно да $3D$ штампа компоненти са супериорним триболошким својствима трења и хабања може имати значајан потенцијал за уштеду драгоцених ресурса и енергије. У исто време, реализација овог потенцијала је озбиљно отежана углавном због велике храпавости површине металних делова као што су делови произведени неком од техника $3D$ штампе [145, 146].

7. 3D ШТАМПА

3D штампа, позната као адитивна производња, представља иновативан процес којим се тродимензионални објекти креирају слој по слој на основу дигиталних модела. Ова технологија омогућава постизање сложених геометријских облика и високу прецизност, што је чини погодном за широк спектар примена, укључујући прототипирање и персонализовану производњу. Савремени системи 3D штампе доприносе смањењу отпада материјала и убрзавању производних процеса, чиме се повећава ефикасност и флексибилност у индустрији.

7.1 Технологије 3D штампе

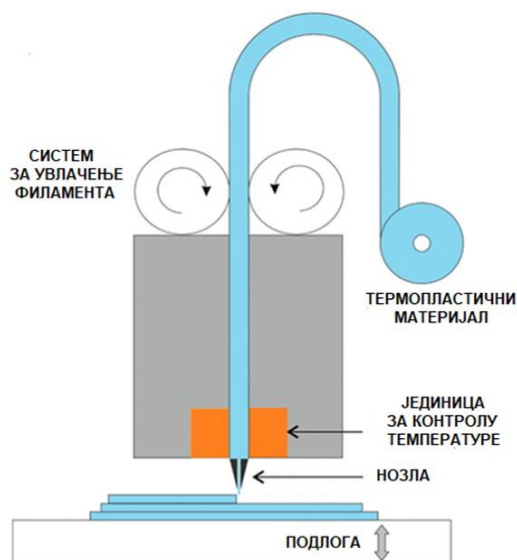
Много различитих процеса и технологија 3D штампе изумљено од краја 1970. године. Штампачи су првобитно били веома велики и скупи и нису имали широку примену као што је то случај данас. Развојем нових технологија 3D штампе, производни процес је постао доступан како компанијама, тако и појединцима. Неке од метода које су најзаступљеније су селективно ласерско топљење (*SLM*), селективно ласерско синтеровање (*SLS*), метода фузионог таложења (*FDM*), стереолитографија (*SLA*) или производња објеката ламинирањем (*LOM*).

7.1.1 Технологија фузионог таложења (*FDM*)

Метода фузионог таложења (*FDM*) представља једну од најпопуларнијих метода 3D штампања. Да би направила делове сложених облика, *FDM* технологија користи помоћни материјал, поред материјала за израду, који помаже у одржавању структуралног интегритета дела током процеса штампања. Када се штампање заврши, материјал који је служио као потпора се уклања. Ово се може постићи ма два начина, разбијањем или растварањем помоћу одговарајућих растварача [147, 148].

FDM је једна од најбрже растућих технологија 3D штампе и интензивно коришћен процес у производњи прототипова и функционалних компоненти у бројним инжењерским апликацијама [149]. *FDM* методу развио је S. Scott Crump касних 1980-их, а дизајнирала ју је 1990. године компанија *Stratasis*. *FDM* је први пример система за екструзију материјала [150]. У овој техници, модел се производи екструдирањем малих зрна материјала који се стврдњавају и формирају слојеве. Термопластични филамент или жица која је намотана у котур се одмотава како би довела материјал до главе екструзионе млазнице (слика 7.1). Обично се користи жица дебљине 1.75 - 3 mm. Током 3D штампе, материјал у облику жице се топи проласком кроз млазницу пречника 0.4 mm и производња се врши аксијалним померањем [147]. Глава млазнице загрева материјал до одређене температуре и укључује и искључује проток филамента. Обично се корачни мотори користе за померање главе за екструзију у Z-смеру и подешавање протока према захтевима. Глава се може померати и у хоризонталном и у вертикалном смеру, а управљање механизмом се врши помоћу софтверског пакета за компјутерску производњу (*CAM*) који ради на микроконтролеру [151]. Ова технологија је исплативија од свих осталих технологија 3D штампе и има веома велики избор термопластичних материјала у употреби. Производња са *FDM* штампом значи и краће

време испоруке. Иако је *FDM* најисплативија технологија, у поређењу са другим технологијама *3D* штампе, има најнижу резолуцију. То је чини мање одрживом опцијом за делове са веома малим и прецизним детаљима [152].



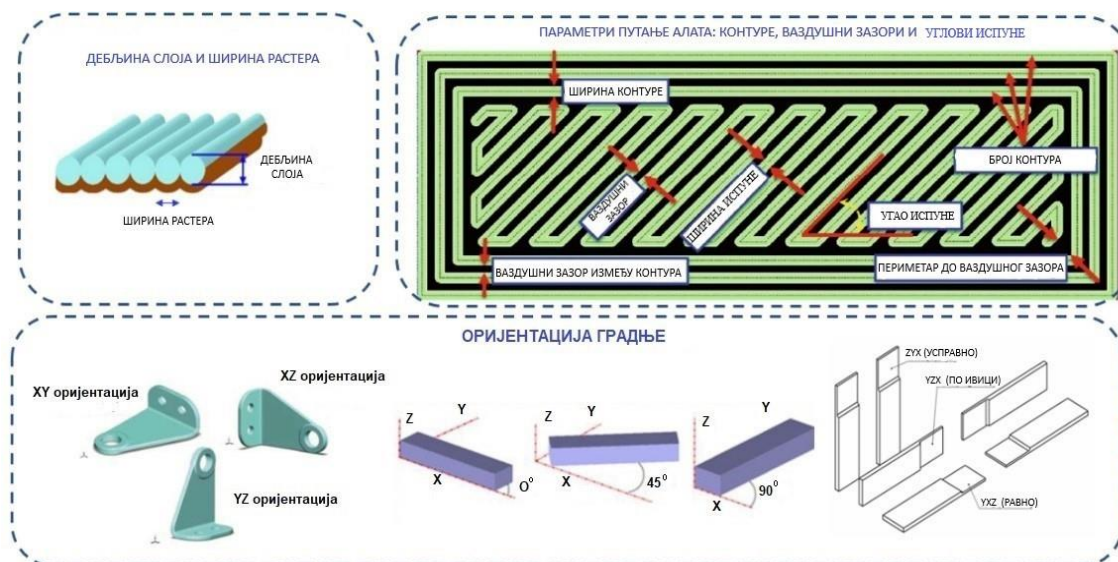
Слика 7.1 Принцип рада *FDM 3D* штампача [153]

FDM укључује различите параметре који се могу класификовати у три главна типа: процесне параметре (угао испуне, дебљина слоја, оријентација грађења, брзина штампања, густина испуне, ваздушни зазор, образац испуне, температура екструзије); параметре животне средине (температура платформе, температура омотача, влажност, кисеоник, итд.); остали параметри штампања (пречник млазнице, боја материјала, пречник филамента, итд.). Иако сви ови параметри утичу на квалитет *FDM* штампаних делова, утицај који могу имати различити параметри процеса (слика 7.2) се најчешће анализирају због њиховог значајног утицаја на механичке перформансе и ефикасност производње [154].

Кључно је посматрати понашање и приањање материјала на подлогу када *3D* штампач који користи ову технологију почне да штампа свој први слој. Ако се материјал не лепи, потребно је проверити растојање млазнице од радне површине мерењем у више тачака по целој површини, а растојање мора бити слично дебљини листа папира. Да би се смањила вероватноћа да се филамент одвоји од подлоге, препоручује се чишћење подлоге алкохолном пре сваке сесије *3D* штампања.

У процесу *FDM 3D* штампања, може доћи до неких од најчешћих проблема као што су "савијање", "недовољно екструдирање", "превише екструзија" као и неприањање филамента на радну површину. Примарни узрок "савијања" је пластично скупљање током хлађења. Ово би могло довести до скупљања од неколико милиметара за многе велике *3D* штампане делове. „Недовољно екструдирање“ се односи на недовољно филамента који излази из млазнице, што може проузроковати видљиве празнине између суседних екструзија сваког слоја. „Прекомерно екструдирање“ је супротност недовољној екструзији, где прекомерни излаз филамента из млазнице може довести до

вишка пластике која може у потпуности променити спољашње димензије $3D$ штампаних делова, чинећи их нефункционалним и неуредним. Када се филамент не залепи за радну површину, млазница наставља да избацује филамент, који у $3D$ штампању изгледа као нити у ваздуху. Ово представља само неке од основних проблема који се могу појавити током процеса $3D$ штампе [156].



Слика 7.2 Процесни параметри FDM технологије [155]

Многе различите индустрије одлучују се за употребу FDM технологије. Индустрије укључујући аутомобилску, ваздухопловну, електронску, свемирску као и широк спектар произвођача делова различитих намена. Они користе FDM јер им пре свега помаже у развоју производа, изради прототипова и производном процесу. Произвођачи одређених производа користе FDM технологију пре свега због термопластичних материјала који се користе током развоја и савршени су за прототипове [157]. Једна од кључних предности FDM -а (индустријских и нискобуџетних) је широк спектар материјала. Ово укључује термопласте као што су PLA и ABS , инжењерске материјале као што су TPU и $PETG$ и термопласте високих перформанси, укључујући $PEEK$, PEI и $ULTEM$ [158]. PLA и ABS су једни од најчешће коришћених. ABS је економичан инжењерски полимер који се лако обрађује и производи, има добру отпорност на ударце, отпорност на хемикалије, одличну обрадивост, висок естетски квалитет, као и релативно високу чврстоћу и крутост [159]. PLA је синтетички, алифатични полиестер — компостабилни, биоразградиви термопласт који се добија из обновљивих извора, термички је нестабилан и показује брз губитак молекулске тежине услед загревања или изложености топлотним изворима. PLA има тенденцију да током времена повећава крост у односу на друге пластичне масе [160]. Напреднији FDM штампачи такође могу да штампају и са другим специјализованим материјалима који нуде својства као што су већа отпорност на топлоту, отпорност на ударе, хемијску отпорност и крутост [161]. Избор правог материјала је прва фаза дизајна производа; заправо, на основу потреба дизајна, радног окружења и осталих утицаја на део, неопходно је размотрити

прави избор материјала који ће се користити. Постоји много фактора које треба узети у обзир при избору материјала:

- Механичка својства, која у суштини прво сужавају избор материјала за прототип,
- Температура употребе (*HDT - CUT*): *HDT* означава температуру на којој је узорак подвргнут при оптерећењу савијањем и пластичним деформисањем, док *CUT* или температура континуиране употребе означава температуру на којој материјал може непрекидно да се користи неограничено време. Оба ова податка су пресудна за избор материјала,
- Могућност штампања – неизбежно захтеви за штампање и величине ограничавају избор на материјале који се могу правилно употребити са изабраном *3D* штампачу и
- Завршна обрада - у случају да постоји потреба за добрим естетским резултатом биће потребно проценити да ли се изабрани материјал може третирати накнадном површинском завршном обрадом. Неки материјали, могу бити веома ефикасни у *FDM*-у *3D* штампачу, али не могу дати пријатан естетски излаз.

Трошкови штампе – На крају, али не и најмање важно, трошкови такође играју улогу у процесу доношења одлуке о избору материјала [162]. Табела 7.1 показује неке од предности и недостатака *FDM* материјала за штампу [163].

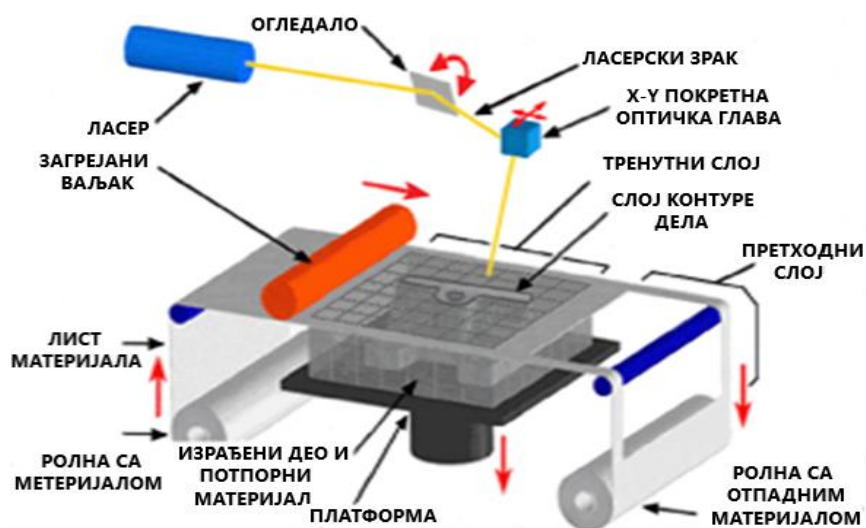
Табела 7.1 Предности и недостаци *FDM* штампе

Предности	Недостаци
Нискобуџетна технологија	Грубост површина
Мање сложена	Искривљење је уобичајено
Лака ергономија	Зачепљење млазница
Разноврсност избора материјала	Дуже време штампања
Лака преносивост	Проблем адхезије слоја (померање слоја)
Компактан дизајн	Ниска чврстоћа
Филаменти за виšekратну употребу	Често је потребна калибрација подлоге

7.1.2 Технологија производње објеката ламинирањем (*LOM*)

Године 1991. *Helisis*, компанија коју је касније наследио *Cubic Technologies*, увела је револуционарни производни процес познат као производња ламинираних објеката. Ова иновативна техника подразумевала је спајање листова материјала, а затим коришћење дигитално вођеног ласера да би се прецизно исекао жељени објекат. Упркос свом пионирском раду, *Helisis* је престао са радом 2000. године. Браћа *Sonog* и *Fintan* *MacCormack* развили су оригинални процес 2003. користећи стандардни канцеларијски папир и *inkjet* штампач. Папир је затим наношен слој по слој пре него што се сечиво од волфрама искористи како би се одсекао отпадни папир и добио коначни објекат. Браћа *MacCormack* комерцијализовала су *LOM* преко своје компаније, *Mcor Technologies*,

која је наставила да развија процес користећи *СМИК* боју за штампање живописнијих објеката који би се могли користити за промоцију или визуелну израду различитих прототипова. Овај нови процес подразумевао је да су листови папира штампани у боји пре него што су селективно лепљени и исечени. У овом процесу, познатом као ламинација селективног таложења (*SDL*), лепак се наноси само на области које одговарају дизајну, чинећи коначни предмет лакшим за сечење. [164]. Производња ламинираних објеката (*LOM*) представља један од производних процеса штампе који се користи за креирање објеката помоћу папира, пластике и метала. У овој технологији, папирни или пластични ламинати се сукцесивно лепе заједно и жељени облик предмета сече помоћу ласерског резача. У овом процесу производње ламинираних предмета, у почетку се лист спаја са подлогом помоћу загрејаног ваљка, а затим се користи ласер за праћење жељених димензија модела или прототипа. У суштини, ласер уклања област која није део објекта, а затим се платформа са завршеним слојевима помера наниже. Након тога, нови лист се умотава у положај, а платформа се враћа у првобитни положај да би поново примила следећи слој као што је и приказано на слици 7.3.



Слика 7.3. Основна шема *LOM* процеса, којој се могу додати додатни кораци обраде. Непрекидни ток материјала је означен црвеним стрелицама[169].

Процес се понавља све док се модел или прототип не заврши [165, 166, 167]. Преко софтвера за *LOM*, *CAD* модел је хоризонтално исечен у гомилу танких слојева, при чему сваки слој представља просечни попречни пресек на датој висини. Ласерски зрак затим сече периферију сваког попречног пресека од непрекидног листа материјала и један по један слој одоздо према горе. Сваки рез се аутоматски и прецизно везује за свог претходника. На крају, тродимензионални објекат се гради слој по слој [168].

У процесу производње ламинираних објеката као једној од врста *3D* штампе, кључни параметри процеса за постизање успешног прототипа су температура ваљка, брзина ваљка, удубљење ваљка и време ласерског сечења. Поред ових основних параметара процеса, својства материјала и конфигурација делова утичу на унутрашње напоне, локалне деформације настале током процеса и квалитет везивања [170].

LOM омогућава производњу релативно великих модела по повољним ценама и ниској брзини обраде. Производња делова са надвишеним структурама није проблематична због чињенице да материјал ван контура модела остаје на месту током читавог поступка изградње и тако делује као потпора за осетљиве делове. Међутим, уклањање ламинираног потпорног материјала може бити заморно упркос томе што се они други укрштају у кубичне елементе током поступка изградње. Сложени резови и шупље структуре не могу се успешно произвести осим ако се производни процес не прекине ради уклањања унутрашњег материјала. У поређењу са другим *3D* технологијама, квалитет површине и тачност димензија *LOM* произведених модела нису на највишем нивоу [171]. Ова технологија је веома разноврсна јер се скоро сваки материјал може лепити. Током овог процеса производње, слојеви папира, пластике или металних ламината обложених лепком, сукцесивно се лепе заједно. Најчешћи материјал који се користи је папир јер се лако сече. Пластика се такође може користити, користећи сечиво или ласер током фазе сечења. Метални лимови су ретко коришћени јер су фазе сечења и лепљења компликованије [172]. У табели 7.2 приказане су предности и недостаци ове технологије.

Табела 7.2 Предности и недостаци *LOM* технологије [173]

Предности	Недостаци
Не захтева потпорну структуру	Потешкоће у везивању слојева
Брза израда	Нижи квалитет површина
Нема хемијских реакција па комора није потребна	Није идеална за комплексне геометрије
Лако се праве велики модели	Није погодно за шупље предмете

LOM машине се првенствено користе за брзу израду прототипова делова од пластичних маса. Приступачност и брзина ових машина чине погодним стварање прототипова, упркос чињеници да добијени објекти нису погодни за употребу као завршни делови. У данашњем архитектонском свету, ова технологија служи као драгоцену средство за израду прецизних и детаљних модела зграда и структура. Кроз производњу ламинираних објеката, архитекте су у могућности да побољшају визуелизацију и презентацију својих дизајна креирањем физичких модела са већом прецизношћу.

LOM се користи за израду алата и калуца за различите производне методе. Прецизна и брза производња чини га одрживом опцијом за развој прототипова алата и калуца пре финалне производње. Свестраност *LOM*-а, са својим избором материјала и способношћу за производњу сложених облика, чини га погодним за персонализовану производњу. Било да се ради о роби широке потрошње или специјализованим индустријским деловима, *LOM* пружа флексибилно решење [174].

7.1.3 Технологија селективног ласерског синтеровања (*SLS*)

Технологија селективног ласерског синтеровања (*SLS*) која је средином 1980-их изумљена у Америци, је техника брзе производње, која користи CO_2 ласере велике

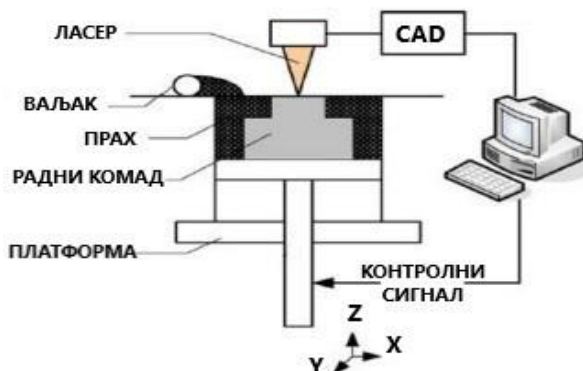
снаге за спајање честица. Ласер синтерује прашкасте материјале (металне, керамичке или полимерне материјале као што је бели најлонски прах). За свако следеће ласерско скенирање, платформа или подлога треба да се спусти. Јединствена карактеристика овог процеса је да се понавља један по један слој док не достигне жељену висину објекта. Током процеса изградње, није му потребан никакав додатни материјал за подршку јер несинтеровани носач од других прахова окружује и штити модел. Несинтеровани прахови се ручно уклањају након штампања. *SLS* производи издржљиве, прецизне делове и може да користи широк спектар материјала. То је савршена технологија за потпуно функционалне делове за крајњу употребу али и прототипове. *SLS* је прилично сличан *SLA* технологији у погледу брзине и квалитета. Главна разлика је у материјалима, јер *SLS* користи прашкасте супстанце, док *SLA* користи течне смоле. Због тога се широк избор терморективних смола може користити у *SLA*, међутим, не могу се обрадити помоћу *SLS*-а. Ово доприноси већој популарности *SLA* у односу на *SLS* [175].

Примарни делови *SLS 3D* штампача су [176]:

- Ласер (обично CO_2 ласер) се користи за синтеровање пластичних честица. Ласер се усмерава помоћу огледала за скенирање које усмерава ласер да прати попречни пресек слоја,
- Систем испоруке материјала: Систем испоруке материјала складишти сав прах. Како је део изграђен, овај механизам снабдева материјал за поновни премаз.
- Уређај за поновно наношење слоја вуче материјал из система за испоруку праха и полаже га на подлогу за штампање/претходне слојеве,
- Постоље за штампање се помера надоле како се део штампа, обично између 50 и 200 микрона по слоју у зависности од захтеване резолуције. Танак слој пластике се поставља на слој за штампање за сваки нови слој помоћу уређаја за поновни премаз и
- Грејачи одржавају запремину грађе на повишеној температури како би помогли у процесу синтеровања смањујући енергију потребну ласеру за синтеровање праха.

Постоји значајан број параметара који значајно утичу на геометрију и механичка својства добијених узорка. Неки од њих се могу контролисати, као што су густина ласерске енергије, локација у комори, дебљина слоја, температуре коморе, оријентација узорка у омотачу зграде, стратегија скенирања и брзина, док други фактори, као што су температурни градијенти у праху и контракција при хлађењу, може се сматрати буком [177]. Када је у питању процес (слика 7.4), посебан прах се поставља на платформу, а затим се фокусирани ласерски зрак користи за загревање праха у малим деловима, слој по слој. Ласерским зраком управља огледало које се може кретати у различитим правцима како би помогло да се прах држи заједно. Након што се сваки слој заврши, платформа се помера надоле и додаје се нови слој праха. Сваки додатни прах се изглађује, а затим ласерски зрак поново прелази преко *2D*

облика. Ово се наставља све док се не направи коначни производ. Готов производ може бити врућ, тако да се мора охладити пре него што се њиме рукује [178].



Слика 7.4 Шематски приказ *SLS* технологије [179]

Површинска обрада коју производи *SLS* је мало грубља од других технологија *3D* штампања - обично се креће у распону од 100-250 *PMC* - али и даље ради прилично добро за већину функционалних прототипова. Веома фин текст је још једна ствар коју треба узети у обзир - пошто је минимална величина функције код *SLS*-а 0.030 mm, веома мали фонтови имају тенденцију да се заглаве прахом, чинећи слова и бројеве мање читљивим. Прелазак на уметнути текст даје боље резултате, али је и даље ограничен на карактеристике које нису мање од приближно 0.020 mm. На крају, *SLS* је нешто мање тачан од конкурентских процеса ласерског синтеровања - где *DMLS* има очекиване толеранције од ± 0.003 mm плус додатних 0.001 mm. на металним деловима, ± 0.003 плус ± 0.001 mm је обично оствариво са *SLS* [180]. Материјали доступни за *SLS* омогућавају употребу у распону од пластике отпорне на ударце до опција на бази стирена које су одличне за гипсане и металне одливе. Најчешћи материјал за селективно ласерско синтеровање је најлон, високо способан инжењерски термопласт за функционалну израду прототипа и производњу за крајњу употребу. Најлон је идеалан за сложене склопове и издржљиве делове са високом стабилношћу околине. *SLS 3D* штампани најлонски делови су јаки, чврсти, чврсти и издржљиви. Завршни делови су отпорни на ударце и могу да издрже виšekратно хабање. Најлон је отпоран на UV зрачење, светлост, топлоту, влагу, раствараче, температуру и воду. Поред најлона, полипропилен (*PP*) је још један популаран *SLS 3D* материјал за штампање. *PP* је идеалан за производњу потпуно функционалних, лакних делова који нуде механичка својства уобичајених полипропилена ливених убризгавањем, обезбеђујући издржљивост у захтевним окружењима за прототипове или крајњу употребу [181]. Као што име сугерише, метални прахови обложени полимером су направљени премазивањем металних честица у танком слоју полимера. Користи се у различитим индустријама укључујући аутомобилску, ваздухопловну, електронику и медицинске уређаје. Често се користе за производњу лакних компоненти високе чврстоће које су отпорне на хабање, корозију и замор [182]. Предности и недостаци ове технологије дати су у табели 7.3.

Ова технологија се користи у различитим индустријама. Индустријске примене *SLS* штампе укључују прављење алата и машина, као што су бургије за бушилице и индустријске компоненте које захтевају високу прецизност, попут зупчаника, лежајева и других механичких делова.

Табела 7.3. Предности и недостаци *SLS* технологије [183]

Предности	Недостаци
Не захтева потпорну структуру	Скупа опрема
Рециклирајући материјали	Узак избор материјала
Комплексне геометрије	Ниска резолуција
Добре механичке особине	Искривљење делова
Велика радна запремина	Остатак праха
Брза израда	Захтева додатну обраду

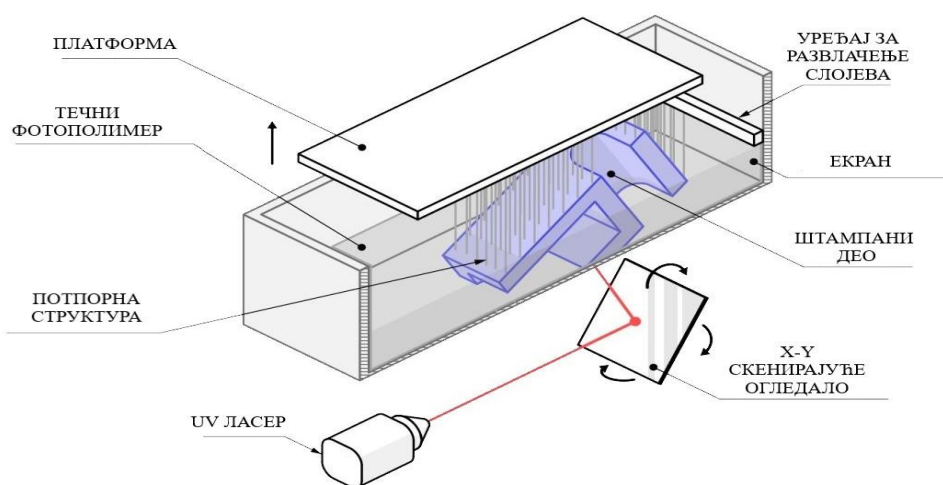
Последњих година, ваздухопловна технологија постаје све више зависна од процеса производње адитива. Као резултат тога, потражња за производном опремом способном за производњу сложених делова при великим брзинама драматично се повећала током претходних деценија. Због своје високе прецизности и брзине, *SLS* технологија је одиграла значајну улогу у напретку ваздухопловних технологија. *SLS* технологија је први пут развијена 1980-их за производњу металних протетика. Од тада је његова примена значајно порасла због свестраности. Медицинске примене селективног ласерског синтерованња (*SLS*) прошириле су се на производе као што су зубни имплантати, замене костију, зглобови кука, па чак и слушни апарати по мери. Поред тога, *SLS* штампачи су коришћени за креирање прототипова за хируршке инструменте и алате. Ови примери показују како потенцијална употреба *SLS*-а наставља да се шири и побољшава здравствену заштиту [183].

7.1.4 Технологија стереолитографије (*SLA*)

Стереолитографија, или *SLA 3D* штампа, једна је од најпопуларнијих и најраспрострањенијих метода штампања у свету адитивне производње. Упркос томе што је мање популарна од *FDM* технологије у хоби круговима, *SLA* је заправо најстарија техника производње адитива и једна од најпопуларнијих у индустријским окружењима. Технологију и термин креирао је 1986. *Chuck Hull*, оснивач компаније за *3D* штампање *3D Systems*. Према његовим речима, *SLA* је метод креирања *3D* објеката сукцесивним „штампањем” слојева, при чему је мислио на очвршћавање фотоосетљивог материјала слој по слој. *SLA* је био први улазак у област брзе израде прототипа током 1980-их и наставио је да напредује у широко коришћену технологију [184].

Типична десктоп *SLA* машина садржи *UV* ласер за очвршћавање специфичног слоја компоненте из резервоара фотоосетљиве смоле. Дно резервоара је провидно и *UV* ласер је прецизно контролисан да прати *2D* контуру објекта.

Процес стереолитографије почиње са стандардном језичком датотеком (*STL*), која је сада основа за сваки процес *3D* штампе. Резањем *STL* датотеке, *3D* модел се преводи у *2D* резове који садрже информације о попречним пресецима. Према овим *2D* резовима, физички модел се може произвести слој по слој. Основа стереолитографије је реакција очвршћавања смола, што је егзотермни процес полимеризације који карактеришу реакције хемијског унакрсног повезивања. Реакција се покреће снабдевањем енергијом *UV* светлости и постоје два прелаза током процеса реакције очвршћавања: гелирање и витрификација. Гелирање представља процес преласка из течног стања у чврсто или получврсто стање тј.гел. Током овог процеса, долази до пораста вискозности и материјал прелази у еластичан или гумаст гел. Витрификација је постепен, термо-реверзибилан процес који доводи до преласка из течног у стакласто аморфно стање [186].



Слика 7.5 Процес стереолитографије [185]

SLA користи варијацију материјала са широким спектром карактеристика укључујући меке, провидне, веома стабилне, па чак и материјале отпорне на топлоту [187]. Генерално, *SLA* користи смоле које се очвршћавају на *UV* зрачењу. Обично су на епоксидној или акрилној бази, ређе на винилној бази. Све смоле су течне и очвршћавају се када су изложене *UV* зрачењу. Иако је у почетку било само неколико смола, углавном ниских перформанси, данас постоји много материјала високих перформанси, са широким спектром карактеристика [188]. Конвенционалне епоксидне смоле, акрилне смоле или термопластични еластомери чине већину материјала који се користе у *SLA* технологији [189].

Након уклањања уграђеног дела са платформе, све потпорне конструкције које су биле неопходне за процес штампања потребно је исећи са зеленог дела. Чишћење у одговарајућим растварачима и сушење конструкције често је праћено брушењем остатака носача. Накнадно очвршћавање у *UV* комори може се применити да би се завршила конверзија реакције полимеризације и тиме постигла побољшана механичка својства [190]. Као и остале технологије, стереолитографија има своје предности и недостатке [191].

Предности стереолитографије:

- Материјал за вишекратну употребу – Могуће је користити део течног фотополимера (нестврднутог) који остане у резервоару за даље штампање. Ова карактеристика смањује потрошњу материјала,
- Прецизне толеранције – *SLA* може постићи толеранције од само 0.01 mm,
- Комплексне геометрије – *SLA* може да генерише моделе са сложеним геометријама, укључујући косе површине, без угрожавања квалитета штампе,
- Квалитетна завршна обрада – *SLA* отисци излазе са глатком површином директно са штампача. Ова карактеристика смањује потребу за даљим површинским третманима и
- Производња великих делова – Индустијски *SLA* штампачи омогућавају *3D* штампање компоненти са величинама до 1500x750x500 mm.

Недостаци:

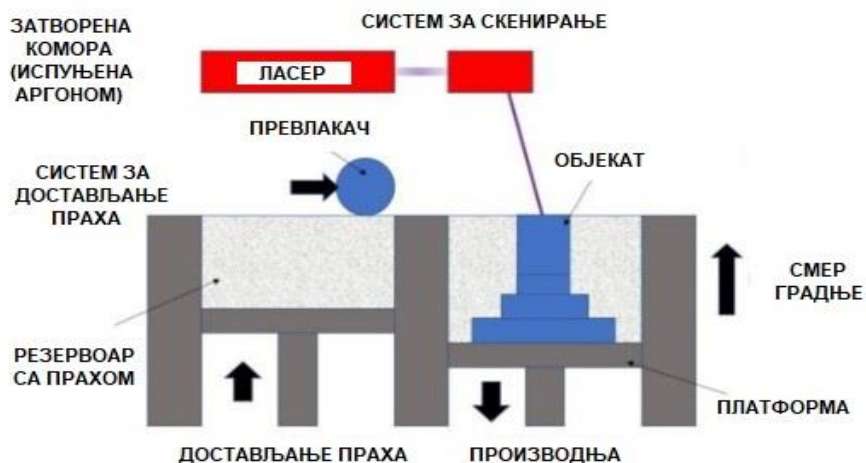
- Нефункционалност прототипова – Узорци направљени *SLA* технологијом су обично крхки, тако да нису тако адекватни као функционални прототипови,
- Фотоосетљивост – С обзиром на природу процеса, *SLA* узорци су осетљиви на сунчеву светлост. То значи да се механичка и визуелна својства могу деградирати ако су изложени сунцу,
- Потребна потпорна структура – *SLA* захтева потпорну структуру за све узорке, без обзира на њихову геометрију, и зато овај захтев утиче на количину потребног материјала. Такође повећава време производње јер је неопходна накнадна обрада за уклањање ових структура и
- Почетни трошкови – Почетна инвестиција потребна за производњу *SLA* прототипа може бити висока.

SLA је веома свестран метод са применама у разним индустријама. Ваздухопловна и аутомобилска индустрија могу, на пример, имати користи од брзе производње материјала високих перформанси. Микрофлуидика и медицина су такође значајне области у којима *SLA* показује велики потенцијал и већ се успешно примењује [192]. *SLA* технологија се такође користи за креирање калупа и узорака ливења. Производњом висококвалитетних, прецизних калупа, компаније могу да поједноставе своје процесе обликовања и ливења. *SLA* омогућава производњу калупа сложене геометрије и финих детаља, што резултира висококвалитетним крајњим производима. *SLA* технологија је такође стекла популарност у индустрији накита. Коришћењем висококвалитетних смоластих материјала, *SLA* може да произведе детаљне и замршене дизајне накита са високом прецизношћу и финим површинама. Ово пружа дизајнерима и драгуљарима прилику да креирају јединствене и персонализоване комаде накита. У области архитектуре и дизајна, *SLA* се користи за креирање детаљних модела и прототипова зграда и структура. *SLA* технологија омогућава тачност и визуелизацију концепата дизајна, помажући архитектама и дизајнерима да пренесу своје идеје клијентима и заинтересованим странама [193].

7.1.5 Технологија селективног ласерског топљења (*SLM*)

Развој технологије селективног ласерског топљења започео је средином 1980-их на Универзитету у Тексасу. За комерцијализацију проналаска основана је компанија *DTM* и први систем за ласерско синтеровање, назван *Sinterstation 2000*, ушао је на тржиште 1992. Године 1994. други комерцијални *SLS SYSTEM, EOSYNT (P) 350*, испоручила је немачка компанија *EOS GmbH*. [194].

У поређењу са традиционалном технологијом обраде метала, *SLM* технологија може да заврши производњу делова без употребе калупа. Стога, *SLM* процес захтева релативно мање припреме и има природне предности у укупној производњи и производњи сложених делова. Пошто *SLM* користи суперпонирани процес, он такође има неке предности у скраћењу времена штампања [195]. Селективно ласерско топљење је метода адитивне производње помоћу праха који може да креира функционалне *3D* штампане делове засноване на компјутерском дизајну. *SLM* је скраћеница за селективно ласерско топљење, које се дешава када се прах потпуно растопи уместо да буде синтерован или делимично топљен. Током читаве процедуре, слојеви металног праха се потпуно топе и комбинују један на други користећи енергију ласерског зрака велике снаге. Као резултат тога, делови захтевају само површинску обраду или се производе без потребе за додатном обрадом. Слика 7.6 приказује шематски дијаграм процеса. Примери као што су медицински делови по мери, алати са каналима за хлађење и функционалне компоненте сложене геометрије показују широк спектар примене за овај процес [196].



Слика 7.6 Дијаграм *SLM* процеса [197]

Многи фактори утичу на тачност *SLM* процеса у *3D* штампани. Детаљно испитивање ових фактора омогућава разумевање основних механизма и омогућава ефикасно пројектовање процеса, јер постоји преко 100 процесних параметара. На баланс топлоте утичу фактори као што су стратегија скенирања и снага ласера, док на брзину зграде утиче растојање између тачака скенирања, линија скенирања и време потребно за скенирање сваке тачке. Спроведени експерименти имали су за циљ да утврде како су

одређени фактори утицали на густину делова који се производе – одабрани су параметри који се испитују:

- Снага ласера – P [W]: Снага ласера је један од најважнијих процесних параметара *SLM* технологије. Ова вредност одређује избор осталих параметара процеса, а избор снаге ласера је уско повезан са величином ласера са фокусом,
- Дебљина слоја – L [μm]: Дебљина слоја је повезана са процесним параметрима и
- Удаљеност између линија за скенирање – Pt [μm], размак локација скенирања - L [μm] и време потребно за скенирање једне локације - t [μs].

Сваки од ових параметара утиче на квалитет изграђених елемената и време које је потребно за њихову изградњу. Кључно је одредити најбоље вредности параметара како би се постигла највећа брзина и најмањи дефекти у финалном производу [198]. Селективно ласерско топљење (*SLM*) може произвести металне компоненте користећи различите метале и металне легуре. Алуминијум, нерђајући челик, титанијум и специфичне суперлегуре су уобичајени материјали који се користе у *SLM 3D* штампању и широко се користе у индустријама као што су ваздухопловство и медицина.

Штавише, племенити метали попут злата, платине, паладијума и сребра се обрађују кроз *SLM* за сектор накита. Легуре алуминијума су познате по својим предностима, укључујући лагану, чврсту и отпорну на корозију. Ови квалитети их чине веома траженим за различите индустријске намене. *AlSi10Mg* је популарна *SLM* легура позната по одличној заварљивости, јаким својствима и термичким карактеристикама. Легуре титанијума су веома цењене због своје изузетне чврстоће, мале тежине и врхунске отпорности на корозију. Ове карактеристике су савршене за изазовне инжењерске задатке. *Ti-6Al-4V* је најпопуларнија легура титанијума у *3D* штампању због одличне комбинације чврстоће, отпорности на корозију и заварљивости [199]. Примарна употреба легура магнезијума је у стварању лаких структура због њихове мале густине. Штавише, због своје способности да буду компатибилни са живим ткивима, они имају потенцијал да се користе као апсорбујући материјали за биоразградиве имплантате за замену кости. У будућности, коштани шавови ће користити биоразградиве имплантате од легуре магнезијума.

Недавно су легуре магнезијума постале врхунски избор за биоразградиве полимере због њихове јаке носивости. *SLM* технологија омогућава производњу појединачних биоразградивих имплантата сложеног облика користећи легуре магнезијума. Генерално, магнезијум и његове легуре су добро успостављене у *SLM* апликацијама. Када се посматрају различити материјали погодни за *SLM* штампу, легура титанијума се истиче као врхунски избор због своје високе ефикасности у обради и чистоће. Поред тога, титанијум је способан да производи сложене делове на *SLM* платформи.

Ti-45Nb је уобичајена легура титанијума која се користи за биомедицинске имплантате због свог ниског модула еластичности (~62 GPa) и брзог хлађења. Поред тога, *Ti-45Nb* показује изузетну флексибилност, ефективну отпорност на корозију и јаку хемијску отпорност, првенствено због заштитног слоја развијеног на површинама делова од титанијума. Нерђајући челик *316L*, који се обично назива титанијум челик, познат је по својој јакој отпорности на корозију, импресивној чврстоћи на високим температурама и недостатку магнетних својстава. Широко се користи у цевоводима, прехранбеној индустрији, поморској и биомедицинској опреми, горивним ћелијама и другим областима. У последњих неколико година, многи истраживачи су проучавали употребу нерђајућег челика *316L* као сировине за технологију *SLM 3D* штампања [200]. *SLM* технологија омогућава производњу сложених дизајна који се не могу постићи традиционалним техникама производње као што су ливење, металургија праха, ковање и екструзија. Слично другим методама адитивне производње, употреба селективног ласерског топљења за производњу биомедицинских уређаја има финансијски утицај омогућавајући брзу производњу без великих трошкова. У поређењу са традиционалним методама производње, *SLM* је веома погодан за производњу биомедицинских уређаја због својих специфичних могућности [201]:

- Омогућава производњу компоненти прототипа уређаја, за потребе валидације дизајна пре масовне производње,
- *SLM* технологија омогућава производњу компоненти мале количине, посебно током иницијалног дизајна, што омогућава брзу имплементацију било каквих промена дизајна,
- Ова технологија, као и друге технике *3D* штампања, резултирају краћим животним циклусом производа кроз флексибилне фазе производње које обезбеђују краће време до пуштања произведених уређаја на тржиште,
- Практично нема ограничења у изради било које сложене геометрије помоћу *SLM* технологије. Компоненте биомедицинског уређаја које није технички изводљиво за производњу другим конвенционалним методама, на пример, сложене порозне скеле и компоненте са пројектованом порозношћу могу се прецизно произвести помоћу *SLM*,
- Производња биомедицинских уређаја од стране *SLM*-а не захтева додатне скупе алате или опсежне захтеве за монтажом, чиме се директно смањују трошкови производње и
- *SLM* технологија бесплатно дозвољава сложеност и прилагођавање биомедицинских уређаја.

Селективно ласерско топљење садржи одређене препреке које би могле одвратити многе произвођаче да га изаберу у односу на алтернативне методе. У недостатке селективног ласерског топљења се могу навести [202]:

- Делови захтевају значајну накнадну обраду да би се смањило заостало напрезање и побољшала завршна обрада површине, густина, издржљивост и друга механичка својства,

- Употреба потпорних конструкција узрокује губитак материјала и времена јер се морају уклонити и не могу се поново користити, што повећава трошкове производње и
- Величина израде завршног дела је ограничена, што га чини неприкладним за штампање већих објеката.

Технологија је препозната као најпогоднија за производњу делова са танким зидовима, отпорних на притисак и топлоту, сложених облика, што је чини применљивом у различитим секторима као што су машинска обрада, ваздухопловство, аутомобилска, енергетска, медицинска и друге индустрије. Првобитно коришћен првенствено за брзу обраду алата, данас се селективно ласерско топлење *3D* штампање користи за производњу:

- Функционалних деловиа за различите склопове и јединице,
- Сложених конструкција са покретним деловима,
- Елемената за калуповање за ливење термопласта и лаких материјала,
- Прототипова,
- Уметака калупа за ливење под притиском,
- Резервних делова,
- Протеза и имплантаната за специфичне пацијенте,
- Делова у стоматологији и
- Модела накита и још много тога.

7.2 Предности и недостаци *3D* штампе

Као и остале производне технологије *3D* штампа има своје предности и недостатке. Назначено је да су главне предности *3D* штампања смањење трошкова, мање отпада, смањење времена, добијање конкурентске предности, смањење грешака, поверљивост, производња по захтеву. Предности *3D* штампе чине је једном од технологија које највише обећава. Технологија *3D* штампе, отвара потпуно нови начин стварања производа и нуди много предности у односу на традиционалне методе производње

Тренутно су доступне многе различите врсте технологија *3D* штампе. Кроз брз дизајн, висок ниво тачности и способност доношења одлука на основу информација, предности *3D* штампања које чине ову технологију будућом перспективом за многе компаније широм света, али такође истичу њен значај у будућим техникама производње: смањење трошкова; краће време производње; редуција отпада; стварање израженије конкурентности и предности у односу на ривале; могућност грешака се смањује у производном процесу; поверљивост интелектуалне својине јер све остаје унутар компаније; производни процеси на захтев. Ово су неке од главних предности, и у наставку ће оне бити приближније описане [203-206]:

- Смањење трошкова (мање трошкова рада машина, материјала и рада). Смањење трошкова је од великог значаја за пословање невезано за производни сектор. Трошкови рада машине играју веома важну улогу у укупним трошковима

производног процеса. Док енергија потребна за стварање делова у индустријском окружењу може бити велика, способност развоја и креирања сложених делова и производа у једном кораку ствара повећан ниво ефикасности и штеди на времену. Стога се трошкови рада машина надокнађују уштедама направљеним током процеса производње. Једна од добрих страна *3D* штампе је чињеница да су трошкови рада ниски, за разлику од традиционалне производње где се може захтевати да различити људи управљају различитим машинама или је потребна производна линија да би се дошло до финалног производа. Сваки *3D* штампач ће захтевати од оператера да покрене машину и покрене аутоматизовани процес креирања отпремљеног дизајна. Због тога су трошкови рада знатно нижи од традиционалне производње. Асортиман материјала који се користе за *3D* штампу расте и то омогућава смањење цене последњих година,

- Смањење стопе путовања производа до заинтересованих страна. Једна од највећих предности *3D* штампе је што може помоћи и да се смањи удаљеност коју ће производ прећи. Како *3D* штампачи могу да креирају производ од почетка до краја, то омогућава дизајнерима да дизајнирају производ у једној земљи, пошаљу га е-поштом у другу земљу у припреми за производњу. Нема потребе да се креирају прототипови који се морају премештати из фабрике у фабрику да би се процес завршио. Поред дизајна и производње прототипова, такође је могуће да се резервни делови производе на лицу места,
- Одрживија производња, уз мање отпада. Традиционални производни процес је углавном процес где се сировина губи и поново користи изнова и изнова, што доводи до високих трошкова и отпада. Предност *3D* штампања је јединствен начин производње са врло мало отпада,
- Смањење временске компоненте. Једна од великих предности *3D* штампања је то што се делови и производи могу произвести много брже него традиционалним методама. Сложени дизајни се могу креирати као *CAD* модел, а затим трансформисати у стварност за само неколико сати,
- Израженија конкурентска предност. Могућношћу да смање време фазе израде прототипа, компаније широм света и из разних индустрија могу да испоруче боље, побољшане производе у краћем временском периоду. Али такође омогућава да се производи рано развијају, чешће се праве прототипови док производ не буде усавршен и спреман за производњу омогућавајући ефикасно лансирање производа. Могућност креирања прототипа у природној величини омогућава дизајнерима да другачије размишљају о производима које дизајнирају. Једна од предности *3D* штампања је та што омогућава брзо креирање производа који људи могу физички држати, уклањајући све недоумице или погрешну комуникацију. Иако може бити прототип и отворен за измене, он барем пружа увид у то како ће производ изгледати, нудећи истинитији приказ од описа,
- Тестирање тржишта уз *3D* штампање. Разумевање да ли ће производ бити успешан захтева много истраживања, посебно када су у питању традиционалне методе производње. Међутим, стварање прототипа путем *3D* штампања

омогућиће компанијама да добију повратне информације од потенцијалних купаца и инвеститора на начин који никада раније није могао бити постигнут. Производ се може прилагодити и мењати до последњег тренутка, што је нешто што традиционалне методе производње не нуде. То значи да *3D* штампа нуди јединствен и вредан начин да се идентификује да ли производ има потенцијал да изађе на тржиште и да у исто време буде успешан,

- Смањење потенцијалних грешака. Када је у питању дизајнирање делова и производа, дизајнери морају узети у обзир ефикасност. Многи делови и производи захтевају велики број корака користећи традиционалне методе производње да би били направљени. Стога сваки корак може довести до грешке, уз ризик да се почне изнова, што може довести до проблема са целокупним производним процесом. Процес производње у једном кораку је кориснији. Постоје многе индустрије које имају дуг и производни процес који се састоји из више етапа. Једна од предности *3D* штампања је то што се производ креира у једном кораку, без интеракције оператера током овог процеса. Наведено уклања зависност од бројних производних процеса и побољшава контролу над финалним производом. Током традиционалног процеса производње, неисправни прототипови коштају време и новац. *3D* штампање може да уклони ризик јер се дизајн може верификовати креирањем прототипа спремног за производњу пре него што се крене са коначном креацијом. Ово помаже да се повећа поверење у дизајн пре улагања,
- Заштита интелектуалне својине и питања поверљивости података. Непрекидна израда прототипа и производња у оквиру компаније помоћу *3D* штампача осигурава да дизајн никада не напусти просторије компаније, штитећи интелектуалну својину. Сваки иновативни дизајн се чува у оквиру компаније, тако да више нема потребе да се пажња посвећује питањима поверљивости и
- Производни процеси на захтев. Могућност пуне слободе у дизајну је велика предност *3D* штампања. Такође омогућава дизајнерима да прилагоде дизајн. Како је *3D* штампање савршено за једнократну производњу и изградњу појединачних делова у једном процесу, то значи да је могућност прилагођавања могуће искористити. Стога су многе индустрије, попут медицинске и стоматолошке, прихватиле *3D* штампање и дизајн због могућности креирања прилагођених имплантата и помагала. Традиционалне методе су се ослањале на калупе и сечење, што чини прилагођавање процесом који одузима много времена.

Евидентни су и недостаци *3D* штампања, који се морају узети у обзир. Неки од недостатка су [207]:

- Иницијални трошкови набавке *3D* штампача (повраћај инвестиције је брз и ефикасан, али и даље стоји да је потребно спровести иницијално инвестирање),
- *3D* штампа у производњи врло често захтева накнадну обраду,

- Фактор времена је такође од великог значаја у смислу да у зависности од величине и квалитета штампача, штампање може потрајати од неколико сати неколико дана, при чему када штампач направи грешку када је скоро завршио и
- Утилизација процесом *3D* штампе захтева низ посебних вештина у вези са *3D* моделовањем.

Помоћу *3D* технологија могуће је брзо керирати дизајн нових производа и направити прототипове за веома кратко време јер користи само један корак, односно може се урадити на једном месту. Елиминишу многе фазе које се користе у традиционалној производњи. Као резултат тога, ове технологије не захтевају велике трошкове рада. Као такво, усвајање технологије *3D* штампе може значајно смањити обим и врсту производних процеса. За земље које се ослањају на велики број нискоквалификованих радника, пад броја радних места у производњи могао би драматично да утиче на економију. То представља један од проблема који се мора решавати паралелно са увођењем технологија *3D* штампе у производњу.

7.3 Материјали за *3D* штампу и њихове механичке особине

Када је у питању индустријска *3D* штампа, избор материјала је критичан фактор. Доступан је разноврстан низ материјала, сваки са својим јединственим својствима, предностима и ограничењима. Разматрања као што су тип материјала, текстура, механичка својства, трошкови и захтеви за накнадном обрадом су кључни приликом одређивања најприкладнијег материјала за одређени пројекат *3D* штампања. Балансирање ових фактора за постизање жељених резултата може бити сложен и изазован задатак за оне који се баве *3D* штампом [208].

Један од најзаступљенијих материјала код *FDM* технологије *3D* штампе је полимлечна пластика (*PLA*). Ова пластика је један од најтраженијих материјала за *3D* штампу. Посебност *PLA* је пре свега у томе што је еколошки прихватљив материјал (биоразградив). Прави се од шећерне трске или пулпе шећерне репе, кукуруза, касаве [209]. У поређењу са другим термопластима, *PLA* има ниску ударну жилавост, смањену температуру при производњи као и релативно кратак производни циклус. Комерцијалне мешавине *PLA* полимера се углавном састоје од поли (L) млечне киселине (*PLLA*), међутим, мали део поли (D) млечне киселине (*PDLA*) се додаје да би се снизила тачка топљења како би се производни циклус повећао. Ово доводи до значајног смањења кристалности. *PLA* је такође хидрофобан споро се разлаже. *PLA* је комерцијално најдоступнији полимер на биолошкој бази који се користи у различитим индустријама. *PLA* се користи у комерцијалним производима не само због своје разградљивости нити, већ и зато што је направљен од обновљивих извора, добијени предмети могу бити ефикасно функционални предмети, и пре свега зато што предмети имају одличне особине добијене по прихватљивој цени. Постоје два различита начина за синтетисање *PLA* из мономера млечне киселине. Полимери могу да се синтетишу путем директне поликондензације или путем полимеризације са отварањем прстена коришћењем одговарајућег катализатора [210, 211, 212]. Директна поликондензација млечне киселине подразумева дехидратацију млечне киселине, истовремену

естерификацију мономера и ослобађање воде за сваку додату киселинску јединицу. Полимер високе моларне масе је тешко добити због брзе реакције између воде и формираног олигомера. Због тога се полимеризација са отварањем лактидног прстена широко користи за синтезу *PLA* у индустријском сектору [213, 214]. У појединим специфичним пољима примене, веома важну улогу имала су термичка својства *PLA* материјала. На пример, полукристалне или аморфне *PLA* имају температуре подлоге и температуре топљења од око 55 °C и 180 °C . Поред тога, у зависности од свог састава и молекулске тежине, *PLA* може имати различита термичка својства [215]. У условима који укључују комбинацију влаге, кисеоника и природних микроорганизама, *PLA* материјал се може лако разградити, а предност је што ће након разградње остати вишак материјала који није токсичан [216, 217].

За механичка својства *PLA* материјала у *FDM* технологији штампе, већина истраживача је најчешће испитивала затезну чврстоћу, где се и показало да *PLA* надмашује типичне полимере, укључујући полипропилен (*PP*), полиетилен (*PE*) и полистирен (*PS*). Са друге стране, *PLA* је имао нижу ударну чврстоћу и издужење од полиамида (*PA*), *PE*, *PP* и *PET* [218].

Акрилонитрил бутадиен стирен (*ABS*) је такође један од често коришћених материјала у *3D* штампању. Добра механичка својства и екструзабилност чине га пожељним избором у употреби рециклираних или биоразградивих филамената [219]. У већини случајева, *ABS* садржи 15 % до 35 % акрилонитрила, 5 % до 30 % бутадиена и 40 % до 60 % стирена. Међутим, ове пропорције не морају бити овакве јер у прилично широком спектру коришћења *ABS* -а може долазити до промена у зависности од сврхе употребе. Типично, *ABS* је производ систематске полимеризације мономера, наиме, акрилонитрила, бутадиена и стирена [220]. Постоје две фазе *ABS* терполимеризације: континуирана фаза стирен-акрилонитрил и дисперзована фаза полибутадиена. Код комерцијално доступних врста *ABS*-а, површински сјај може бити и низак и висок, док су својства топлотне дисторзије висока [221].

ABS полимери показују високу жилавост (чак и у хладним условима), адекватну крутост, добру термичку стабилност и високу отпорност на хемијске реакције. Остале значајне особине *ABS*-а укључују ниску цену, издржљивост и низак коефицијент топлотног ширења. Лакоћа обликовања омогућава израду димензионално стабилних делова са високим квалитетом површине. Ниједан други термопластични материјал не показује тако квалитетну комбинацију технички важних својстава [222]. Номенклатура „налик *ABS*-у“ се прати из разлога јер се добијају механичка својства слична уобичајеном *ABS*-у, али уз различита хемијска својства [223].

Полиетилен терефталат гликол (*PETG*), полимер на бази кополиестера, који се добија од полиетилен терефталата (*PET*), привлачи пажњу за *3D* штампу због свог потенцијала који све више добија на значају у производним процесима. Садржи додат гликол и за разлику од *PET*-а, не долази до кристализације [224, 225]. Главна предност употребе *PETG*-а састоји се у његовој ниској цени и већој чврстоћи од других полимерних филамената. Да би се побољшало механичко и термичко понашање *PETG*

филамента, углавном се користе неки од адитива као што су стаклена влакна, угљеничне наноцеви и угљенична влакна. *PETG* је одличан материјал за механичке делове који су изложени јаким ударима али и онима који могу бити изложени умереним топлотним оптерећењима. Овај материјал је отпорнији на хабање и ударце од *ABS*-а, док је и даље веома исплатив за многе индустријске гране [226, 227].

Полиамид (*Nylon*) је витална класа термопластичног материјала који поседује веома добра механичка својства. Међутим, производи добијени *FDM* технологијом који су направљени од чистог *Nylon*-а имају проблеме повезане са савијањем, изобличењем и недостатком задржавања облика. Ови недостаци ограничавају употребу у *FDM* штампању. Континуирано пуњење полимера кристалношћу доводи до несавремене контракције запремине, а самим тим распоред молекуларног ланца додатно утиче на повећавање изобличења и смањење запремине. Сходно томе, савијање овог материјала у *FDM*-у може бити спречено ометањем систематског формирања молекуларног ланца. Квалитетнији делови могу се направити променом фактора штампе као што су дебљина слојева, оријентација штампања (угаона, хоризонтална и вертикална), угао и ширина испуне и ваздушни зазор [228, 229, 230].

Алифатски полиамиди су много чешћи и производе се у много већем обиму. Током бризгања они су аморфни или благо кристални. Два најчешћа и најважнија алифатична полиамида су поликапролактан (*Nylon 6*) и поли хексаметилен адипамид (*Nylon 6.6*). Оба имају добра механичка својства као што су висока флексибилност, висока затезна чврстоћа, висока ударна чврстоћа (живавост) и добра еластичност. Оба имају добра механичка својства на повишеним температурама док су температуре топљења од 260 – 283 °C [231]. Главни недостатак *Nylon-6* и *Nylon-6.6* је што су осетљиви на влагу што доводи до смањења механичких својстава. Влага/вода делује као пластификатор и може смањити затезну чврстоћу за преко 50 %. Алифатични полиамид који има бољу отпорност на влагу је *Nylon 6.12*. Мање је хидрофилан од *Nylon-6* и *Nylon-6.6* због већег броја метилених група. Нажалост, ово се одражава на степен кристалности и тачку топљења [232].

Полипропилен (*PP*) је термопластични полимер широко коришћен у индустрији *3D* штампе захваљујући комбинацији повољних својстава. Као материјал, *PP* има ниску густину (око 0.9 g/cm³), што доприноси његовој лакоћи, али истовремено пружа добру механичку чврстоћу. Његова еластичност и отпорност на удар чине га изузетно погодним за апликације где су потребне издржљивост и флексибилност. *PP* се одликује високом ударном чврстоћом, што значи да може апсорбовати енергију без лома. Његова отпорност на замор омогућава дуготрајну употребу у апликацијама које укључују поновљена оптерећења. Модул еластичности *PP*-а обично се креће између 1.1 и 1.5 GPa, што га чини релативно крутим, али довољно флексибилним за многе примене [233]. Један од изазова при коришћењу *PP*-а за *3D* штампу је његов висок коефицијент термичког скупљања (око 1.8 %). Ово може довести до деформација и пуцања током процеса хлађења. Због тога се препоручује коришћење грејаних комора и правилна припрема површине за штампање како би се минимизирали ови ефекти [234]. *PP* је изузетно отпоран на хемикалије, укључујући киселине, базе и многе

органичне раствараче. Ова својства га чине погодним за израду делова који ће бити изложени агресивним хемијским средствима. Такође, *PP* има ниску апсорпцију воде, што доприноси његовој стабилности у влажним условима [235]. *PP* се користи у разним индустријама због својих изванредних својстава. У аутомобилској индустрији, користи се за израду делова као што су браници, панели и разни унутрашњи делови због своје отпорности на ударце и ниске тежине. У медицинској индустрији, *PP* је цењен због своје биокompatibilности и отпорности на стерилизацију, што га чини погодним за израду медицинских уређаја и амбалаже [236].

Поликарбонат (*PC*) је високо цењен материјал у свету *3D* штампе због својих изузетних механичких својстава и термичке стабилности, што га чини идеалним за широк спектар примена. Поликарбонат се одликује високом ударном чврстоћом и отпорношћу на лом, што га чини изузетно погодним за примене где је потребна издржљивост и заштита од удараца. Затезна чврстоћа поликарбоната може варирати од 60 МПа до 75 МПа, док модул еластичности износи око 2.1-2.5 GPa [237]. *PC* има високу температурну стабилност, са тачком топљења око 260 °C и температуром стакластог прелаза од око 145 °C. Ово својство омогућава поликарбонату да задржи своје механичке особине и при високим температурама, чинећи га погодним за примене у којима је потребна отпорност на топлоту (238). Поликарбонат је отпоран на многе хемикалије, укључујући киселине, базе и многе раствараче. Међутим, треба обратити пажњу на компатибилност са одређеним органичким растварачима као што су ацетон и бензен, који могу узроковати оштећења материјала [239]. Поликарбонат се широко користи у аутомобилској индустрији за израду делова као што су фарови, браници и унутрашњи панели због своје високе чврстоће и отпорности на ударце. У електронској индустрији, користи се за израду кућишта за електронске уређаје због своје отпорности на високе температуре и електричну изолацију. Такође, *PC* је популаран у медицинској индустрији за израду стерилизабилних делова и медицинских помагала због своје биокompatibilности и отпорности на стерилизацију [240]. У табели 7.4 дат је приказ материјала и њихових механичких особина.

Табела 7.4. Механичке особине неких од најчешће коришћених материјала [244]

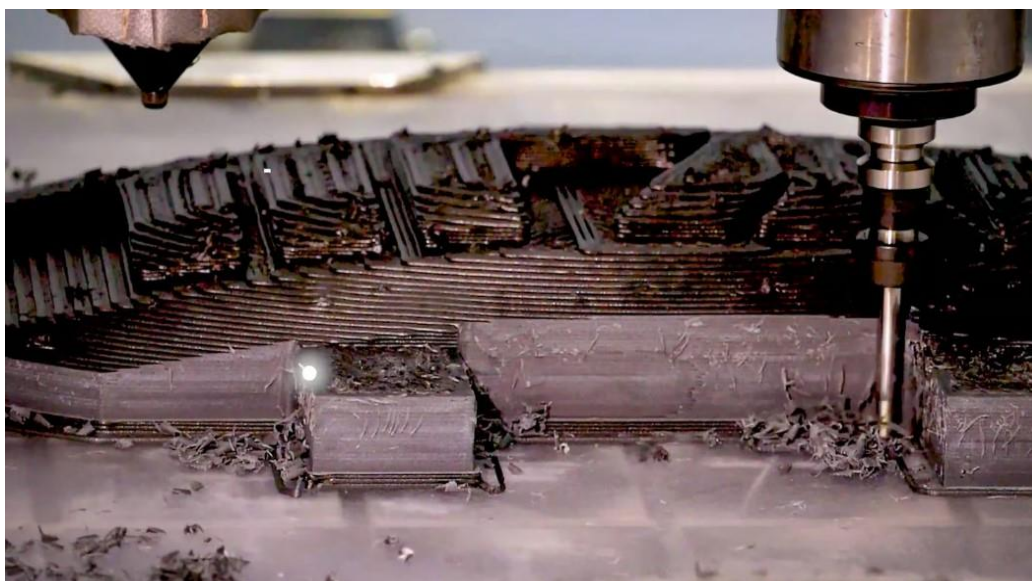
	<i>PLA</i>	<i>ABS</i>	<i>PETG</i>	<i>NYLON</i>	<i>PC</i>	<i>PP</i>	МЕТАЛИ
Чврстоћа	40МПа	60 МПа	53 МПа	40-85 МПа	72 МПа	2 МПа	20-30 МПа
Крутог	5/10	7.5/10	5/10	5/10	6/10	4/10	10/10
Густина	1.04g/cm ³	1.24g/cm ³	1.23g/cm ³	1.06 - 1.14g/cm ³	1.2g/cm ³	0.9g/cm ³	2 - 4g/cm ³
Максимална радна температура	98°C	52°C	73°C	80-95°C	121°C	100°C	52°C
Коефицијент термичког ширења	90µm/m-°C	68µm/m-°C	60µm/m-°C	95 µm/m-°C	69 µm/m-°C	150 µm/m-°C	33.75 µm/m-°C
Савитљивост	-	-	-	+	-	+	-
Еластичност	-	-	-	-	-	-	-
Отпорност на ударе	+	-	-	+	+	-	-
UV отпорност	-	-	-	-	-	-	-
Отпорност на топлоту	+	-	-	+	+	+	-

Различити типови металних материјала обрађени су металним 3D штампањем. То укључује чисте метале (злато, бакар, ниобијум, тантал, титан), прах легура (на бази алуминијума, на бази кобалта, на бази бакра, на бази гвожђа, на бази никла и на бази титана) и мешавине праха (бакар - композиције на бази, гвожђа и степеневане композиције као што су *Ni-Al*, *Ti-Ni*, *Ti-Mo* и *Ti-V*). Широки спектар суперлегура на бази никла, легура титанијума [241]. Прах од нерђајућег челика који се користи за 3D штампање долази у различитим класама и легурама, а легура 316L је најчешће коришћена класа у 3D штампању метала. Има састав од 66-70 % гвожђа побољшаног са 16-18 % хрома, 11-14 % никла, 2-3 % молибдена и мање од 0.03 % угљеника. Овај материјал за 3D штампање је познат по својој дуктилности и доброј отпорности на корозију [242]. Као што име говори, ова класа челика се користи за разне алате за производњу. Челици за алате могу издржати захтевне производне услове због своје високе тврдоће и одличне отпорности на високе температуре и хабање. Због ових својстава, алатни челици су веома тешки и скупи за обраду, што их чини идеалним кандидатима за 3D штампање [243].

8. ОБРАДА 3D ШТАМПЕНИХ ДЕЛОВА

Завршна обрада компоненти произведених технологијом 3D штампе може се категорисати у три механизма, и то: механичка конверзија и машинска обрада, термички процеси који укључују електронски сноп или ласерско топљење и електрохемијске и хемијске процесе, као што су електрополирање и слично. Неколико субтрактивних процеса обраде традиционално увелико се користи у производним процесима као што су бризгање, ливење и ливење под притиском. Ово је сада проширено на адитивну производњу, омогућавајући да се геометријске карактеристике реализују са већом прецизношћу и квалитетом површине путем неке од субтрактивних метода обраде [245].

Глодање је једна од типичних метода завршне обраде 3D штампаних делова која елиминисе ефекат степенасте површине делова, чеме се проширује опсег примене 3D штампе на делове повећане тачности и трајност. Комбинација FDM и технологије накнадне обраде глодањем (слика 8.1) представља методу са ниском потрошњом енергије, ниском ценом и одрживим потенцијалом [246]. Према увиду у литературу, три најчешће коришћена фактора у накнадној обради су: брзина помоћног кретања (V_f), брзина резања (V) или број обртаја глодала (n) и дубина резања (ap).



Слика 8.1 CNC обрада 3D штампаног полимера [247]

Алати који се најчешће користе су од брзорезног челика (*HSS*), који добро функционише за већину термопласта. Алат од тврдог метала се препоручује за ојачане материјале. Високе брзине вретена и ход стола су могући уз одговарајуће стезање. Неопходна је пажња приликом стезања материјала на лежиште како би се спречила деформација материјала. Завршна обрада најчешће се изводи помоћу глодала са 2 или 4 зуба, у зависности од материјала и карактеристика струготине. За унутрашње отворе треба користити глодала са заобљеним угловима кад год је то могуће. Ово ће спречити да готов комад има оштре унутрашње углове, који потенцијално могу бити подручја концентрације напрезања [248]. Компаније из производне индустрије све више користе

пластичне или металне делове произведене неком од технологија *3D* штампе, а затим их обрађују на *CNC* машини из следећих разлога [249]:

- Димензионална тачност – Индустрије са високим функционалним и толеранцијским захтевима, као што су производња аутомобила, медицинских и потрошачких производа, морају да постигну поновљиве, строге спецификације. Већина технологија *3D* штампе, као што је *FDM*, може постићи до ± 0.005 mm, али то није довољно за неке критичне карактеристике делова. Са *CNC* обрадом може се смањити толеранција на ± 0.002 mm, што може направити огромну разлику ако производите помоћно средство за монтажу, производни прибор или било који алат у процесу са пројектованим дугим веком трајања и
- Брзина – Други разлог зашто компаније комбинују ове две технологије је брзина. Узимајући у обзир време штампања, *CAD/CAM* подешавање и машинску обраду, процес је и даље много бржи од пројектовања и производње алата за бризгање. *3D* штампање и машинска обрада дају инжењерима већу флексибилност у временском оквиру за побољшање дизајна. То само укључује ажурирање *CAD/CAM* датотека, штампање и машинску обраду новог дела, док уношење измена на алату за бризгање може бити скоро немогуће и скупо, узрокујући велика кашњења у производњи.

Најраспрострањенија техника машинске обраде за *3D* штампане пластичне делове је хоризонтално или вертикално глодање на машинама са 3 осе због њихове способности да се алат креће у *X*, *Y* и *Z* равни. За сложеније карактеристике и геометрије препоручује се глодање на машинама са 5 оса, код којих алат може да ротира и нагиње се по *A* и *B* осе да би се обрадиле сложене површине код малих делова. Ако апликација захтева специфичне димензије, треба прилагодити *3D CAD* податке дела у складу са *CNC* машинском обрадом. Приликом припреме дизајн датотека потребно је обратити пажњу о следећем:

- Додатак за обраду – Додатни материјал треба да се угради у основни *3D* штампани део тако да када се обради, има довољно слојева које алат може уклонити да би се постигла тачна спецификација,
- Обратити пажњу на подручја уских толеранција – Пројектанти обавезно морају бити упућени на критичне димензије које треба да се обрађују. Често се препоручују прилагођавања дизајна за оптимизацију конструкције за машинску обраду, као што је повећање одређене дебљине зида или повећање величине врха и
- Учинити критичне функције доступним – Поставити компоненте које треба да се обрађују према спецификацијама на лако доступном подручју. Чак и глодалице са 5 оса не могу да достигну неке *3D* штампане геометрије, па ако је могуће, треба извршити премештање функције критичне за апликацију на место доступно алату,

Поред наведених разлога, један од најважнијих је свакако побољшање квалитета површине. *3D* штампа генерално не обезбеђује довољно добар квалитет површине и

стога је неопходна накнадна обрада. У табели 8.1 приказани су резултати појединих истраживача који су се бавили овим проблемом и машинском обрадом *3D* штампаних делова.

Табела 8.1: Површинска храпавост измерена у адитивно произведеним и накнадно обрађеним полимерним комадима [250].

Материјал	Технологија <i>3D</i> штампе	<i>CNC</i> технологија	Пре обраде, Ra μm	Након обраде, Ra , μm
<i>ABS</i>	<i>FDM</i>	Глодање	Од 17 до 50	Од 1 до 35
<i>VeroClear</i>	<i>Material Jetting</i>	Стругање	Од 0.14 до 1.07	Од 0.14 до 0.32
<i>Polyamid</i>	<i>SLS</i>	Брушење	Преко 15	2.85
<i>PLA</i>	<i>FDM</i>	Глодање	Од 17.332 до 56.021	Од 4.870 до 24.511

Код делова чији је дизајн веома сложен и није га могуће остварити са конвенционалном *CNC* машинском обрадом, *3D* штампа делова од метала може бити одлична алтернатива. Код производње *3D* штампаних металних делова, у највећем броју случајева захтева се завршна обрада након скидања са *3D* штампача [251].

Генерално, процес *3D* штампе метала може да произведе делове са толеранцијама од ± 0.07 mm (± 0.02 mm), али са постпроцесном *CNC* обрадом (слика 8.2), толеранције могу бити доста мање. Да би се ове карактеристике обрадиле, потребно је обезбедити цртеж као додатак *CAD* фајлу који наводи карактеристике и потребне толеранције. Током фазе прегледа дизајна, треба накнадно прегледати фајл како би утврдило да ли су наведене толеранције достижне. Постпроцесна обрада се такође може користити за побољшање квалитета завршне обраде површине. Храпавост површине на деловима може да се креће од 200-400 μm у зависности од оријентације, материјала и дебљине слоја. *CNC* машинском обрадом након постпроцеса, могуће је смањење храпавости површине од 63 μm [252].



Део након *3D* штампе

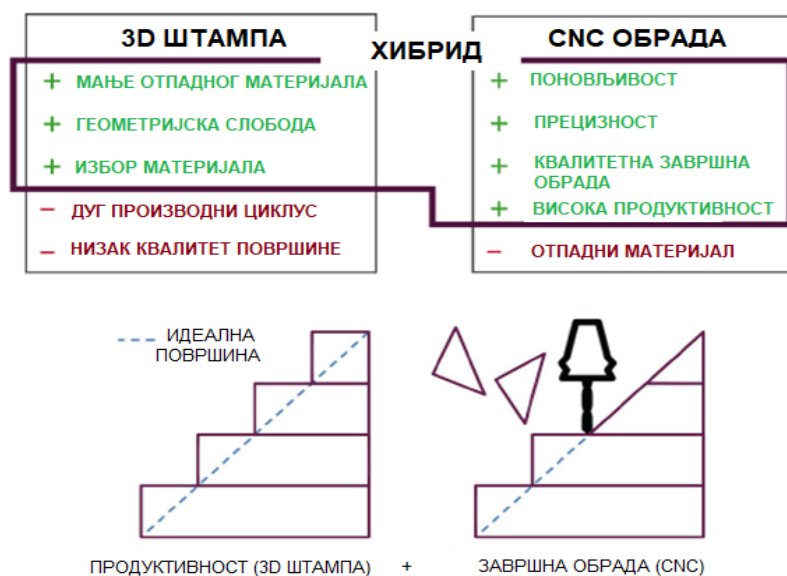


3D штампани део након *CNC* обраде

Слика 8.2. *3D* штампани метални део пре и после *CNC* обраде [253]

9. МОГУЋНОСТ ИНТЕГРАЦИЈЕ 3D ШТАМПАЧА И CNC МАШИНА

Док 3D штампа и даље представља револуцију у изради прототипа и производње у специфичним апликацијама, још увек није могуће заменити CNC обраду или бризгање који су најзаступљенији. Међутим, комбиновање CNC обраде и 3D штампе може се показати одличним за смањење времена израде као и лакше испуњавање захтева дизајна. Комбиновање ова два процеса (слика 9.1) може донети доста релевантних предности за производну индустрију [254]. Америчка компанија *Hybrid Manufacturing Technologies* била је прва која је развила хибридни систем 3D штампе и глодања под називом *AMBIT™* 2013. године. Најизразитија карактеристика *AMBIT* система су његове патентиране главе за 3D штампу које се могу додати било којој CNC машини за производњу нових или поправку постојећих делова, са аутоматизованим процесом замене [255].



Слика 9.1 Концепт хибридног производног процеса [256]

Пре него што се хибридни производни приступ примени, важно је разумети предности и недостатке сваке методе. Кратак преглед технологија 3D штампе и CNC обраде, као и предности и недостатака сваке од њих дат је у табели 9.1 [257].

Хибридни процес је све истакнутији приступ за повећање флексибилности и ефикасности производних процеса у контексту индустрије/производње 4.0. Уопштено говорећи, хибридизација укључује употребу и конвенционалних и неконвенционалних процеса производње и обраде, обично кроз комбинацију различитих извора енергије/алата или контролисане примене процесних механизма. Поред тога, постигнут је значајан напредак у развоју хибридних машинских/производних система, који интегришу два или више појединачних процеса у један систем. Један пример за то су хибридне машине алатке као што су вертикални обрадни центри, који обједињују различите операције обраде у оквиру једне платформе, омогућавајући више задатака и

комплетну машинску обраду. У скорије време, приметан је тренд ка развоју хибридних производних процеса који комбинују адитивне (*3D* штампа) и супстрактивне (*CNC*) процесе на једној платформи. Ове платформе обично имају мултифункционалну (*multi-tasking*) *CNC* машину алатку, модул *3D* штампе и могућности аутоматског *3D* скенирања и контроле димензија.

Табела 9.1. Предности и недостаци *3D* штампе и *CNC* обраде

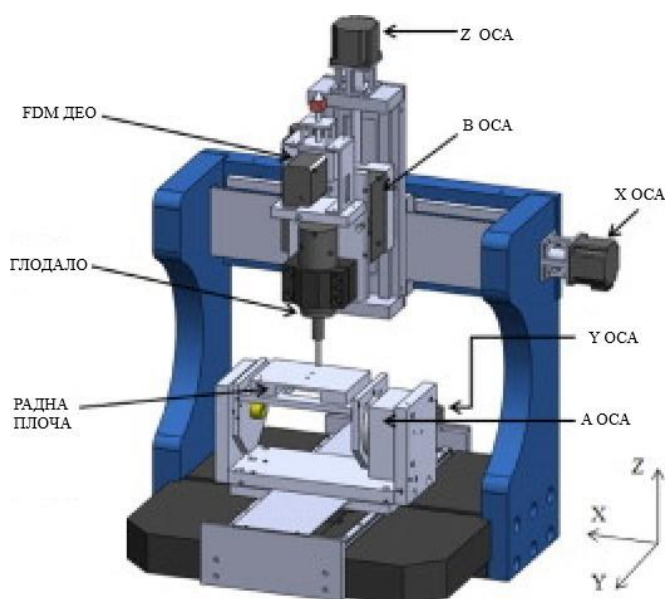
<i>3D</i> штампа	<i>CNC</i> обрада
Додаје материјал како би се направио део	Уклања материјал како би се направио део
Спор процес, идеалан за малосеријску производњу	Бржи процес, идеалан за великосеријску производњу
Бољи за мале делове	Бољи за веће делове
Лош квалитет површине, захтева додатну обраду	Површине са минималном потребном завршном обрадом након операције
Мање прецизне толеранције делова	Може да постигне изузетно прецизне толеранције делова
Јефтинији материјални трошкови	Скупљи материјални трошкови
Мање отпадног материјала	Бише отпадног материјала
Захтевне детаље је лакше креирати	Захтевни детаљи могу захтевати сложене програме

Комбинација адитивних и супстрактивних производних процеса постала је норма за стварање металних делова. Ови делови често захтевају додатну машинску обраду да би се постигао неопходан квалитет површине, ниске толеранције, функционална својства и смањење заосталих напона. Овај хибридни приступ смањује расипање материјала коришћењем праха или фолије уместо чврстих металних залиха, посебно у ваздухопловној индустрији где сложени делови обично подразумевају уклањање 80-90 % запремине материјала током машинске обраде [258-260]. Процеси *3D* штампе и завршне обраде су комбиновани у једну машину без потребе за додатним руковањем и транспортом. Примарне предности коришћења хибридних система у малосеријској производњи и делова са великом варијабилности дизајна су [261]:

- Поправка – Хибридне машине омогућавају коришћење и адитивних и супстрактивних процеса. Примарна примена хибридних система је рестаурација и поправка постојећих компоненти,
- Завршна обрада – Кроз беспрекорну интеграцију *3D* штампе са *CNC* глодањем, могуће је глодати све унутрашње и спољашње површине како би се постигао традиционално висок квалитет завршне обраде,
- Прецизност – Хибридна производња омогућава да се у истом референтном координатном систему врше операције *3D* штампе и глодања, омогућавајући тако мање толеранције,
- Додавање захтевних карактеристика – У традиционалној производњи, више делова се заварује и леми у коначни производ. С друге стране, дизајн хибридне производње своди компликоване, вишеделне у један део, а захтевне карактеристике се додају по периферији. Једноделна градња смањује време, рад и трошкове и

- *3D* штампа са више метала – Делове који се састоје од више метала тешко је произвести чак и уз помоћ *3D* штампе. Архитектура хибридног система омогућава да део почне са предформом материјала А, дода материјал Б користећи адитивну производњу, а затим пређе на материјал В за даљу производњу.

CNC глодалица, *3D* штампач и ласерски резач користе троосни ортогонални систем линеарног позиционирања, иако се сусрећу са различитим оптерећењима. За *3D* штампач, систем позиционирања управља силама убрзања и тежином релативно лаганог екструдера. Насупрот томе, систем позиционирања *CNC* глодала мора да се носи са силама резања, као и са тежином и убрзањем тежег вретена, што захтева робусније моторе и чвршћи оквир. Покушаји ентузијаста да претворе своје *3D* штампаче у *CNC* глодалице заменом екструдера са вretenом били су неуспешни због слабијег оквира *3D* штампача што је резултирало прекомерним скретањем. Сходно томе, обрада материјала чвршћих од пластике и дрвета се показала неизводљивом. Машине за адитивну производњу, као што су *3D* штампачи, депонују материјал у областима где он радном комаду недостаје. Супротно томе, машине за субтрактивну производњу уклањају вишак материјала. У ситуацијама када машина не може да приступи овом вишку материјала, одређено подручје за уклањање материјала не може да се обради [262]. Слика 9.2 приказује хибридную машину која се састоји од комбинације *FDM* штампача и *CNC* глодалице.



Слика 9.2 Хибридна *CNC-FDM* машина [263]

Хибридна производња је погодна за велики број индустрија. Свака апликација која се ослања на прецизно произведене делове од метала или термопласта има користи од хибридних производних технологија. Неки од сектора који су посебно погодни за апликацију ове технологије су [264]:

- **Ваздухопловство:** Ваздухопловној индустрији су потребни делови отпорни на топлоту, јаки и лагани делови са ниским толеранцијама. Хибридна производња може произвести ове компоненте од ојачаних термопласта и метала као што је алуминијум,
- **Аутомобилска индустрија:** Мотори и шасије возила садрже огроман број сложених делова. Хибридна производња даје могућност произвођачима аутомобила да производе ове компоненте на једној машини, смањујући трошкове материјала и радне снаге,
- **Опште инжењерство:** Максимално време рада је од виталног значаја за сваку производну индустрију. Са хибридним производним решењима, могуће је поправити покварене компоненте машине, што смањује трошкове и захтева мање сталног инвентара и
- **Медицина:** Хибридна производња може помоћи медицинским професионалцима да направе савршено прилагођене имплантате, протетику и хируршке алате. *3D* компонента омогућава прилагођавање делова, док *CNC* обрада обезбеђује идеалан квалитет дела.

Хибридна технологија производње је још увек у почетној фази развоја и свакодневно се развија. Међутим, различити текући и надолazeћи трендови хибридне производње обећавају бескрајне предности које укључују стварање производа сложене геометрије, краће време производње, мале губитке, ниже трошкове производње итд [265].

10. ПРИМЕНА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У ДОМЕНУ 3D

ШТАМПЕ И CNC ТЕХНОЛОГИЈА

Вештачка интелигенција може се дефинисати као „техничка и научна област посвећена пројектованом систему који генерише резултате као што су садржај, прогнозе, препоруке или одлуке за дати скуп циљева које дефинише човек“ [ISO/IEC 22989:2022]. Данас је ово значење вештачке интелигенције еволуирало даље од пуке обраде података и укључује развој машина способних за учење, расуђивање и решавање различитих проблема. Машинско учење је постало толико „компетентно“ да генерише све, од софтверског кода до слика, чланака, видео записа и музике. Такозвана генеративна вештачка интелигенција, представља следећи ниво којисе разликује од традиционалне вештачке интелигенције по својим могућностима и примени. Док се традиционални системи првенствено користе за анализу података и предвиђања, генеративни системи иду корак даље креирањем нових података сличних подацима о обуци [266]. Постоји пет корака који илуструју како вештачка интелигенција функционише [267]:

- Улаз: Подаци се прво прикупљају из различитих извора у облику текста, звука, видео записа и још много тога. Разврставају се у категорије које алгоритми могу прочитати и оне које не могу. Затим се креирају протоколи и критеријуми за које ће се подаци обрађивати и касније користити за одређене резултате,
- Обрада: Када се подаци прикупе и унесу, следећи корак је да се дозволи да вештачка интелигенција одлучи шта треба урадити са подацима. Вештачка интелигенција сортира и дешифрује податке користећи обрасце из којих учи док не препозна сличне обрасце у подацима који су филтрирани у систему,
- Излаз: Након корака обраде, вештачка интелигенција може да користи те обрасце за предвиђање исхода. У овом кораку, вештачка интелигенција је програмирана да одлучи да ли су одређени подаци „прошли” или „незадовољавајући” – другим речима, да ли се поклапа са претходним обрасцима који одређују исходе који се могу користити за доношење одлука,
- Прилагођавање: Када се скупови података сматрају „неуспешним“, вештачка интелигенција учи из те грешке и процес се поново понавља под различитим условима. Може се десити да се правила алгоритма морају прилагодити и да су потребне измене какоби одговарала скупу података У овом кораку може се вратити на корак са резултатима да би се боље ускладили са условима тренутног скупа података и
- Процена: Коначни корак за вештачку интелигенцију у испуњавању додељеног задатка је процена. Овде технологија вештачке интелигенције синхронизује информације добијене из скупа података да би направила предвиђања на основу резултата и прилагођавања. Повратне информације генерисане из прилагођавања могу да се унесу у алгоритам пре него што се крене напред.

Као и већина наука, вештачка интелигенција подељена је на неколико поддисциплина (слика 10.1), као што су машинско учење, неуронске мреже и генетски алгоритми, које

деле суштински приступ решавању проблема, али се примењују у различитим областима [268].



Слика 10.1 Шематски приказ класификације вештачке интелигенције [269]

За разлику од дигиталних рачунара, где је прорачунавање централизовано, серијско и синхронизовано, у вештачким неуронским мрежама прорачунавање је заједничко, паралелно и несинхронизовано. Основни проблем у раду са вештачким неуронским мрежама које раде са алгоритмом пропагације уназад је везан за квалитет и брзину подешавања тежинских односа у мрежи. Двослојна неуронска мрежа, са довољним бројем неурона, може интерпретирати било коју континуалну функцију. Због тога су још 60-тих година прошлог века истраживани капацитети вештачких неуронских мрежа са простирањем сигнала унапред. Најважније особине компјутерских модела, заснованих на паралелном процесирању, могу се изразити кроз:

- Скуп јединица-елемената за процесирање (неурони, ћелије),
- Одговарајуће стање активације сваке јединице,
- Везе између јединица (свака веза је одредена тежинским односом који дефинише утицај сигнала из неурона j на неурон k),
- Правило простирања сигнала, које одређује ефикасност улазног сигнала који долази из околине посматране јединице,
- Активациону функцију која одређује ниво сигнала активирања на основу укупног улазног сигнала и тренутне вредности прага активације,
- Вредности прага активација, вредности спољних излаза,
- Метод за прикупљање информација тј. правило учења или обучавања и
- Укупно окружење у којем систем ради.

Неурони или процесуирајући елементи у мрежи имају задатак да приме улазне сигнале/информације од окружења или од других неурона, преко веза (синапси), које

могу бити побуђивачке или инхибиторне, као што је речено раније. Улази се могу одредити преко улазног вектора $X = [x_i, \dots, x_j, \dots, x_n]^T$ док се међусобна интеракција између неурона може изразити вектором $W = [w_{ij}, \dots, w_{jj}, \dots, w_{nj}]^T$ где су компоненте овог вектора тежински односи између неурона у мрежи.

Сваки неурон поседује свој потенцијал (потенцијал мировања) који када пређе одговарајући праг условљава активирање неурона. Излазна величина из неурона представља линеарну комбинацију улаза x_i , и одговарајућих тежинских коефицијената w_i , односно $y = \theta_i + \sum_{i=1}^k w_i x_i$, где k представља бројкомпонената улазног вектора [9]. Важно је нагласити да улазна величина θ_i представља величину која је константно активна са интензитетом активације једнаким јединици. Другим речима, овај додатни неуронпредставља величину која омогућује и обезбеђује знатно боље карактеристике представљања улазних информација/сигнала, а самим тим и знања. Уобичајено је да се овај додатни неурон назива биас. Функционалност неурона обезбеђује мрежи способност представљања знања на основу три саставна елемента.

- Улазни оператор $f(W,X)$, који обједињује улазе и тежинске односе међусобних веза W и формира јединствену вредност s (односно $s=f(W.X)=W^T X$), која је на тај начин припремљена за функцију преноса,
- Функција преноса $h(s)$, која обрађује излаз из неуронског улазног оператора (врши интеграцију), формирајући потребну вредност за активациону функцију и
- Активациона функција $f(net,)$, која обрађујући излаз функције преноса управља излазном вредношћу неурона.

Треба нагласити да је функција преноса, код многих неуронских модела, заправо оператор неурона код кога се излаз од улазног оператора проследује директно до активационе функције, мада би требало нагласити да није редак случај да се функција преноса користи као интегрални оператор. Тада се као интегрални оператор користи Ојлерова апроксимација за рекурентну везу излаза неурона. Као што се види постоји великафлексибилност и слобода избора при реализацији неуронских модела.

Једна од кључних компоненти вештачке интелигенције је активациона функција. Активациона функција у контексту неуронских мрежа је математичка функција која се примењује на излаз неурона. Улога функције активације је да уведе нелинеарност у модел, омогућавајући мрежу да научи и прикаже сложене обрасце унутрашњих података. Без нелинеарности, неуронска мрежа би функционисала као модел линеарне регресије, без посматрања на њен број слојева. Постоји неколико типова активационих функција од и до су [270]:

- *Sigmoid* функција: Њена главна карактеристика је да компримује излаз у опсегу од 0 до 1, што је корисно за моделовање вероватноћа,
- *Linear* функција: Линеарни активациони функција једноставно пропушта вредности без икакве промене. Ова функција се често користи у линеарној регресији и на излазним слојевима неуронских мрежа за регресионе задатке,

- *Tanh* функција: *Tanh* функција је слична сигмоидној, али скалира излаз између -1 и 1, што може довести до боље централизације података,
- *ReLU* функција: *ReLU* функција је постала веома популарна због своје једноставности и ефикасности. Активира неурон само ако је улаз позитиван, у супротном излазу је нула и
- *Softmax* функција: *Softmax* функција се користи у излазним слојевима за вишекласну класификацију, јер конвертује логите у дистрибуцију вероватноће.

У табели 10.1 дат је приказ активационих функција, њихове математичке формуле као и предности и недостаци (271-273).

Табела 10.1 Активационе функције

Активациона функција	Математичка формула	Предности	Недостаци
<i>Sigmoid</i>	$\sigma(x) = 1 / (1 + e^{(-x)})$	Излаз је увек између 0 и 1, што олакшава интерпретацију као вероватноћу.	Проблем 'нестајања градијента' (vanishing gradient), где деривати постају веома мали, успоравајући учење.
<i>Linear</i>	$f(x) = x$	Једноставна и лака за имплементацију и корисна за регресионе задатке где је излаз континуирана вредност.	Не може моделирати сложене нелинеарне односе, док у дубљим мрежама може довести до нестајања градината.
<i>Tanh</i>	$\tanh(x) = (e^x - e^{(-x)}) / (e^x + e^{(-x)})$	Центрирана на нулу, што може побољшати конвергенцију модела.	Такође има од проблема са 'нестајањем градијента'
<i>ReLU</i>	$\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$	Брза и једноставно за израчунавање и помаже у решавању проблема 'нестајања градијента'	Проблем 'мртвих' неурона, где неурони могу трајно престати са учењем ако често добијају негативне улазе.
<i>Softmax</i>	$\text{Softmax}(x_i) = e^{(x_i)} / \sum(e^{(x_j)}), \text{ за } j=1 \text{ до } N$	Добро ради за вишекласне проблеме	Израчунавање може бити скупо за велики број класа.

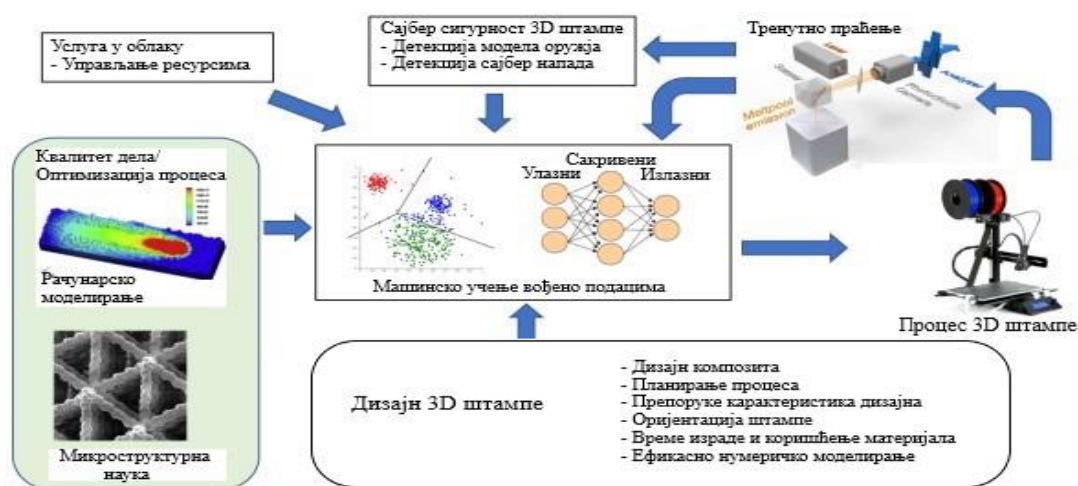
Примена вештачке интелигенције у производњи обухвата широк спектар случајева употребе, као што су предвиђање одржавања, оптимизација ланца снабдевања, контрола квалитета и предвиђање потражње, нудећи трансформативни приступ традиционалним процесима. За произвођаче, прихватање вештачке интелигенције сада представља стратешки корак ка модернизацији операција који за циљ има останак испред у конкуренцији [274].

Вештачка интелигенција и 3D штампа (слика 10.2) били су у врхуистраживања последњих година па су тако добили још више пажње индустрије, јавности и научника. 3D штампа представља технологију која све више добија на значају и чини део савремене производне индустрије под називом Индустрија 4.0, која представља паметну и аутоматизовану производњу. Технике вештачке интелигенције се тренутно пре свега користе за решавање проблема у пред-производној фази 3D штампе [275]. Вештачка интелигенција има потенцијал да знатно утиче на 3D штампање на више

начина. Неки од начина на које вештачка интелигенција може помоћи *3D* штампању су [276]:

- **Побољшан дизајн:** Вештачка интелигенција се може користити за побољшање дизајна *3D* штампаних објеката. На пример, вештачка интелигенција се може користити за оптимизацију структуре објеката како би били јачи или лакши. Такође, може користити за генерисање нових дизајна за објекте које није могуће креирати традиционалним методама. Генеративни дизајн, техника која користи вештачку интелигенцију за генерисање нових дизајна за *3D* штампане објекте, отвара маштовит дизајнерски потенцијал и отвара пут за креативне, али пре свега оптимизоване производе са којима традиционалне *CAD* технологије једноставно не могу да се носе,
- **Смањене грешака:** Вештачка интелигенција се може користити за смањење грешака у *3D* штампању. На пример, вештачка интелигенција се може користити за праћење процеса *3D* штампања и рано откривање потенцијалних проблема. Такође може користити за оптимизацију подешавања *3D* штампача како би се смањила вероватноћа грешака. Чак и мали дефекти у компонентама могу довести до катастрофалних последица (рецимо у ваздухопловној индустрији као пример), али *3D* штампачи са вештачком интелигенцијом могу открити грешке и исправити их пре него што се појаве,
- **Повећана ефикасност:** Вештачка интелигенција се може користити за повећање ефикасности *3D* штампања. На пример, вештачка интелигенција се може користити за аутоматизацију процеса слајсовања *3D* модела у слојеве. То је један од првихи неопходних корака у процесу *3D* штампања, а вештачка интелигенција може помоћи да се процес учини ефикаснијим и тачним. Такође може користити за оптимизацију процеса штампања како би се смањили време штампања и губици материјала,
- **Нови материјали:** Вештачка интелигенција се може користити за развој нових материјала за *3D* штампање. Откривање савршених услова за ефикасно штампање новог материјала зависи и од других параметара као што су брзина штампања и количина материјала депонованог од стране штампача. Вештачка интелигенција је савршен алат за поједностављење овог процеса. На пример, може се користити за дизајнирање нових полимера који су јачи, лакши или издржљивији. Вештачка интелигенција се такође може користити за развој нових метода за штампање са постојећим материјалима,
- **Персонализована производња:** Вештачка интелигенција се може користити за фино подешавање персонализованих *3D* штампаних објеката анализом података о појединачним корисницима и креирањем дизајна и објеката по мери на основу њихових преференција и потреба. Ово може користити при *3D* штампању стоматолошких додатака и протетике и
- **Услуге *3D* штампања вођене вештачком интелигенцијом:** Вештачка интелигенција се може интегрисати у постојеће платформе за *3D* штампање како би понудила препоруке за најприкладније материјале, процесе и дизајн на основу захтева корисника.

Употреба машинског учења у 3D штампању покрива широк спектар апликација, у распону од дизајна за 3D штампање, оптимизације процеса, до надзора на лицу места. Показало се да је машинско учење моћан алат за извођење нумеричке симулације засноване на подацима, препоруке дизајнерских карактеристика, детекцију аномалија у реалном времену и сајбер безбедност (слика 10.2). Машинско учење надмашује конвенционалне методе оптимизације као што је полиномска регресија другог реда, посебно када се ради са подацима високе димензионалности. Утврђено је да су вештачке неуронске мреже најчешћа и најефикаснија техника машинског учења за оптимизацију процеса. Трослојне вештачке неуронске мреже довољанесу за постизање тачности од чак 98 %. Утврђено је и да су конволуционе неуронске мреже ефикаснији од вештачких неуронских мрежа у раду са 2D сликама и 3D моделима због своје способности да користе просторне карактеристике. Стога су конволуционе неуронске мреже пронашле апликације у препознавању карактеристика, препоруци карактеристика у дизајнирању објеката за 3D штампање, као и детекцији аномалија у надзору на лицу места [277].



Слика 10.2 Вештачка интелигенција и 3D штампа [278]

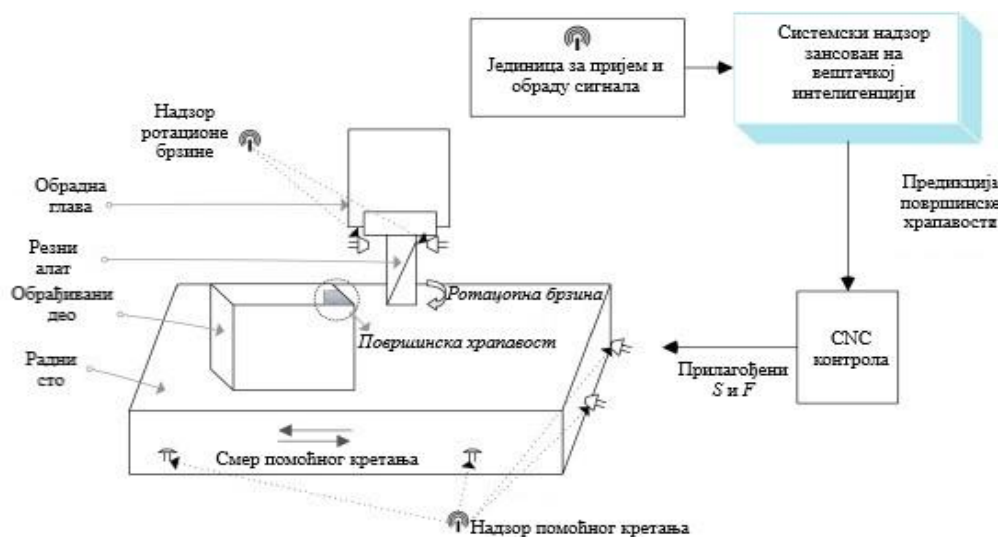
Поред 3D штампања, CNC обрада је једна од најважнијих методологија производње делова, а често се назива и покретачем савремених производних процеса. Аутомобилски и медицински сектори, ваздухопловство, нафтна индустрија као и услуге складиштења користе CNC машинске операције за креирање делова у различитим применама [279]. Вештачка интелигенција све више добија на значају у будућности CNC машинских операција и ови концепти могу имати веома велики утицај на рад производних компанија [280]. На начин на који машина учи, прилагођава се и оптимизује излаз такође могу утицати подаци у реалном времену, аналитика и дубоко учење. Скупови података су од суштинског значаја за оператере како би могли разумети како машина ради и, на крају, како цео систем машина ради заједно [281, 282].

Експанзивни скупови података које генеришу CNC машине нуде значајне могућности за побољшање машинских операција кроз примену машинског учења и аналитике

великих скупова података. Прикупљање сензорских мерења, оперативних параметара, метролошких података и информација о статусу машине, праћено применом алгоритама вештачке интелигенције, може довести до великих трансформација у производним процесима.

Модел машинског учења, када се примењују на податке *CNC* обраде, могу да побољшају процесе обраде, дају врхунски квалитет и утичу на смањење трошкова. На пример, анализа образаца хабања алата и читавања сензора омогућава одређивање оптималног распореда замене алата, смањујући време застоја. Штавише, параметри обраде, као што су брзина помака и брзина вретена, могу се интелигентно подесити да би се оптимизовале брзине уклањања материјала, смањила хрпаовост површине и обезбедила прецизност (слика 10.3).

Стратешко коришћење велике количине сачуваних података из *CNC* машина, метрологије и производних процеса учиниће операције *CNC* обраде интелигентнијим, прилагодљивијим и ефикаснијим. Предстојећа интеграција вештачке интелигенције и великих података у *CNC* процесу обраде је постављена да додатно аутоматизује, побољша и повеже савремени производни процес, сигнализирајући нову еру ефикасности и продуктивности у производњи [283].



Слика 10.3 *CNC* машинска обрада кроз систем за надзор базиран на вештачкој интелигенцији [284]

Неке промене вођене вештачком интелигенцијом у *CNC* машинској обради укључују [285]:

- Повећање ефикасности и продуктивности: *CNC* машине могу да анализирају податке које производе у реалном времену помоћу вештачке интелигенције, обезбеђујући стална ажурирања оператерима. Док вештачка интелигенција анализира податке, може да предложи промене оператерима, повећавајући ефикасност и продуктивност у реалном времену,

- Побољшање перформанси: Машинско учење као подкуп вештачке интелигенције може *CNC* машинама дати капацитет да уче и реагују на упутства. Оператери могу да стекну реалан увид у то како машине функционишу при различитим операцијама, побољшавајући њихов учинак на дужи рок,
- Смањење трошкова производње: Вештачка интелигенција може да трансформише стратегију превентивног одржавања, предвиђајући када је машинама потребно сервисирање и остајући корак испред распореда одржавања. Превентивно одржавање штеди новац, а вештачка интелигенција га чини још ефикаснијим,
- Поједностављене операције: Вештачка интелигенција може да промени сваки елемент рада са *CNC* машинама, од коришћења Интернета Ствари (*IoT*) уређаја до контроле машина и оцењивања њихових перформанси,
- Унапређење аутоматизације: Роботска аутоматизација је већ типична у многим производним окружењима. Када додате вештачку интелигенцију, ови роботи могу да уче док раде, прилагођавајући се неочекиваним ситуацијама и обрађујући свеобухватнији спектар задатака,
- Револуционисање производње прилагођених компоненти: Вештачка интелигенција може да анализира и обрађује обрасце који се понављају, помажући *CNC* машинама да испоруче квалитетне делове са одличном поновљивошћу и минималним грешкама. Интегрисање вештачке интелигенције подиже и прецизност и квалитет дизајна уз смањење отпада по јединици и
- Побољшање тачности производње: Контрола квалитета је од суштинског значаја за *CNC* обраду, а вештачка интелигенција значајно утиче на прецизност и доследност производње. Како машине уче, могу да препознају одступања у обрасцима производње и да се самостално подесе да би одржале тачност или пријавиле грешке у реалном времену како би спречиле да неисправне компоненте уђу на тржиште.

Будућност *CNC* обраде ће готово сигурно бити повезанија са целим производним процесом повезаним путем рачунарства у облаку, са оптимизацијом вештачке интелигенције, дијагностиком и исправљањем грешака. Међутим, у догледној будућности ће и даље бити потребни људски фактори да управљају рачунаром, учитавају дизајн, надгледају процес и отклањају све грешке. Укупан утицај вештачке интелигенције и машинског учења на операције *CNC* обраде је дубок и далекосежан. Иако постоје изазови које треба превазићи, потенцијалне предности ових технологија су огромне. Док настављамо да истражујемо и користимо моћ вештачке интелигенције и машинског учења, изгледа да ће будућност *CNC* обраде бити већа ефикасност, продуктивност и иновације. Како вештачка интелигенција представља технологију која напредује, вероватно је да ће постати довољно напредна да се повеже са софтвером за дизајн и аутоматски мења дизајн ради побољшања резултата. Генеративни дизајн, итеративни процес дизајна који аутоматски оптимизује дизајн, користи се са софтвером који се директно повезује са процесима *3D* штампе или *CNC* обраде [286].

11. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ЊИХОВА АНАЛИЗА

У овом поглављу представљени су резултати експерименталног истраживања, уз детаљан опис коришћене методологије, мерних инструмената и поступака. Циљ експерименталног дела рада је био да се испита утицај промене параметара *3D* штампе (угла испуне) на механичке особине *3D* штампаних делова, да се испитају триболошке карактеристике и др. Такође је испитивано да ли се применом вештачких неуронских мрежа и вишеструке регресионе анализе могу унапред одредити оптимални параметри накнадне обраде *3D* штампаних делова, и да се на основу анализе добијених података потврде постављене хипотезе. У последњем истраживању коришћења су савремени мерни системи у циљу одређивања додатка за обраду *3D* штампаних делова.

Код свих експеримената, најпре су описани услови у којима су спроведени експерименти, затим су приказани резултати мерења и њихова анализа. Сви добијени подаци су обрађени коришћењем одговарајућих статистичких метода, а анализа резултата обухвата поређење са теоријским очекивањима, као и дискусију могућих одступања.

11.1 Утицај броја слојева у зиду и угла испуне на геометрију *3D* штампаних епрувета

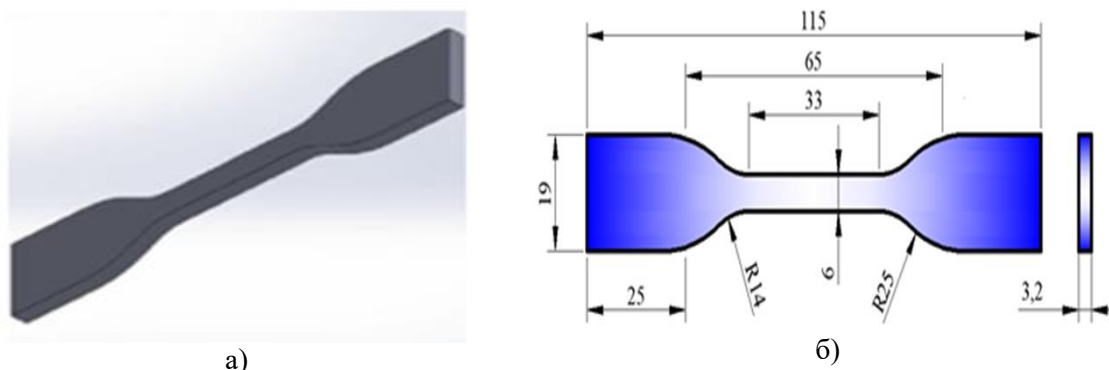
Један од кључних изазова у *3D* штампи је постизање жељених димензионих толеранција, посебно када се користе методе као што је *FDM*. Фактори као што су број слојева у зиду и угао испуне значајно утичу на механичке особине и тачност делова израђених овом техником. Број слојева у зиду и угао испуне могу утицати на чврстину и прецизност финалног производа. Разумевање интеракције између ова два фактора кључно је за оптимизацију процеса *3D* штампе и постизање жељених толеранција у производњи делова који задовољавају високе стандарде у различитим индустријама.

11.1.1 Материјали, методе и опрема

Solidworks 15x64 edition CAD софтвер је коришћен за моделирање епрувета (слика 11.1-а), према *ASTM D638* стандарду (узорак типа 4) је усвојен да би се проценила геометријска одступања као и затезна чврстоћа. *ASTM* стандард је најчешће коришћени стандард у досадашњим истраживањима који омогућава лакше поређење измерених резултата. Димензије узорака за испитивање на приказане су на слици 11.1-б.

3D CAD модел је сачуван као *STL* фајл и увезен је у *Ultimaker Cura 4.11.0* софтвер, где су извршене промене у параметрима штампања (табела 11.1).

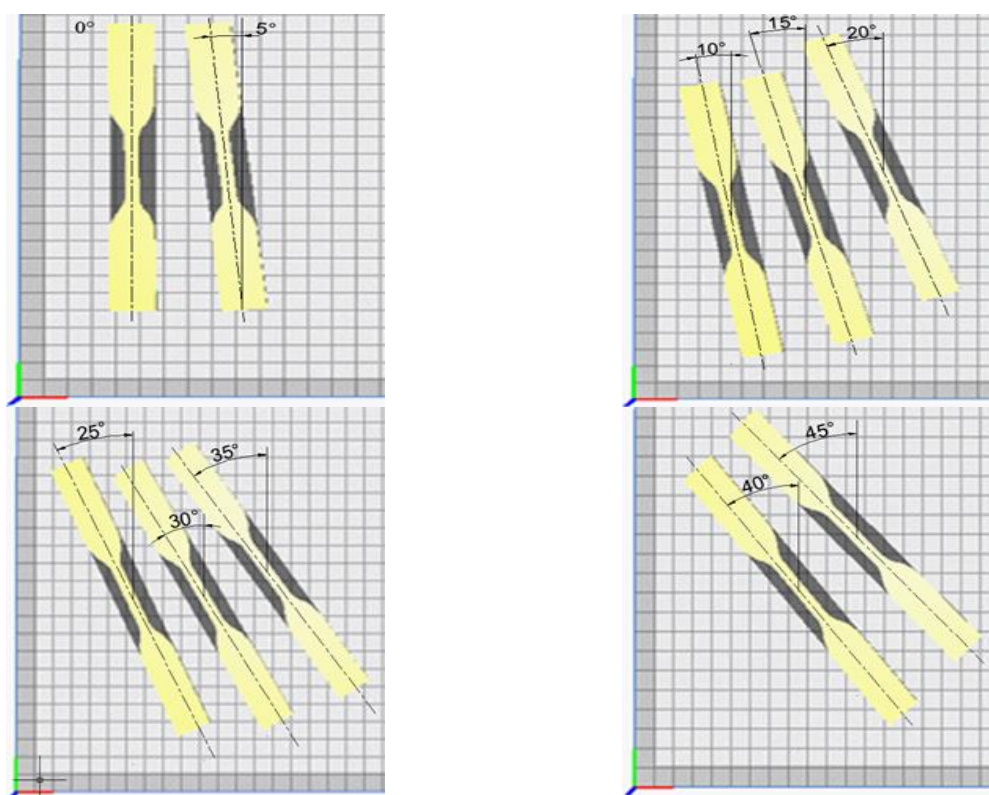
Број слојева зида је варирао од стандардних подешавања до 3, 5 и 7 слојева у зиду за епрувете израђене од *PLA*, и 5 и 7 слојева у зиду за узорке од *ABS* и *PETG*, док је угао испуне промењен од 0°. до 45° а тип испуне била је линија за све узорке, оријентација грађења узорака била је равна, у *XY* равни (слика 11.2). На слици 11.3 приказана је испуна централног дела узорака са 3 слоја у зиду (слика 11.3-а), 5 слојева у зиду (слика 11.3-б) и 7 слојева у зиду (слика 11.3-в)



Слика 11.1 Узорак креиран у *SolidWorks* (а) и према *ASTM D638* стандарду (б)

Табела 11.1 Параметри штампе

МАТЕРИЈАЛ	PLA			ABS		PETG	
Висина слоја, mm	0,2						
Број слојева у зиду	3	5	7	5	7	5	7
Густина испуне, %	100						
Тип испуне	Линије						
Температура штампе, °C	200			230		230	
Температура постоља, °C	50			80		70	
Брзина штампе, mm/s	60			60		60	
Број узорака	10	10	10	10	10	10	10
Угао испуне, °	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45						

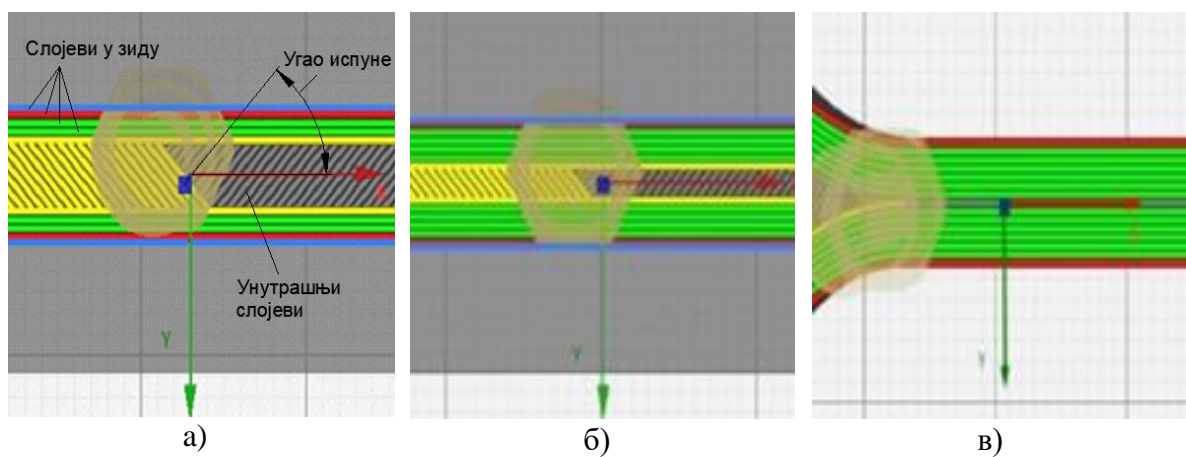


Слика 11.2 Узорци са углом испуне 0°- 45° у односу на радну површину

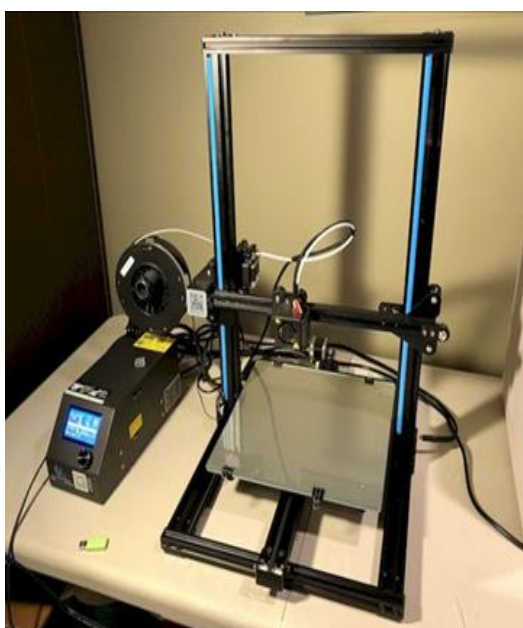
Узорци за испитивање димензионих и геометријских одступања као и затезне чврстоће штампани су на *Creativity 10-s 3D* штампачу (слика 11.4-а), који се налази на Факултету

техничких наука у Косовској Митровици. Карактеристике штампача су: радна површина 300x300x400 mm, пречник млазнице 0.4 mm, брзина штампања нормална 60 mm/s - максимална 100 mm/s, и широк спектар материјала као што су *PLA*, *PETG*, *TPU*, *ABS*. 70 различитих епрувета је креирано и потом штампано са три различита материјала, *ABS*, *PLA* и *PETG*. Епрувете направљене од *PLA* материјала штампани су са 3, 5 и 7 слојева у зиду, док су епрувете направљене од *ABS* и *PETG* материјала штампане са 5 и 7 слојева у зиду. Приказ епрувета након штампе дат је на слици 11.4-б.

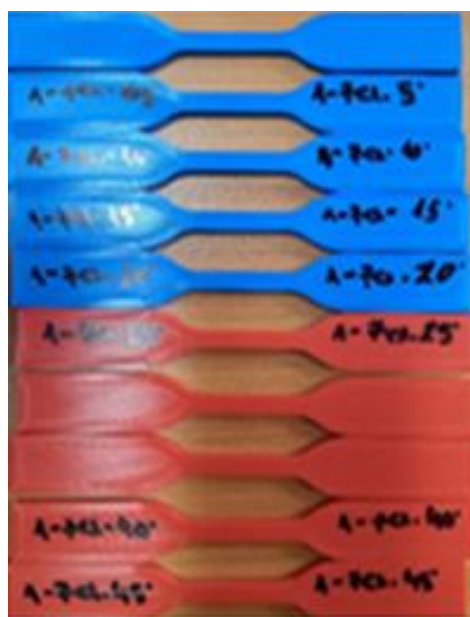
Мерења димензионе тачности вршена су на координатној мерној машини (*CMM*) *Tessa Micro Hite 4-5-4* (слика 11.5) која је позната по својој прецизности и поузданости, посебно дизајнирана за мерење малих и средње великих делова у индустрији. Ова машина користи напредне сензоре и софтверску интеграцију како би пружила високо прецизна мерења, омогућавајући корисницима да прате димензије и геометријске карактеристике производа.



Слика 11.3 Централни део узорка са 3-а, 5-б и 7-в слојева у зиду



а)



б)

Слика 11.4 3D штампач (а) и епрувете након поступка 3D штампе (б)

Кључне техничке спецификације мерне машине:

- Мерни опсег: 400x500x400 mm (по X, Y, Z осима) – омогућава мерење компоненти у оквиру тих димензија,
- Прецизност: $1.5 + L/333 \mu\text{m}$ – изузетно висока прецизност, где је L дужина у милиметрима на којој се врши мерење,
- Поновљивост: $1.5 \mu\text{m}$ – осигурава конзистентност резултата и смањује могућност грешке,
- Сензор: *TESA* високо прецизни контактни сензор – омогућава контактну мерење са минималним одступањима,
- Софтвер: *PC-DMIS* софтвер за анализу и генерисање извештаја – један од најпоузданијих софтверских пакета за *CMM* машине,
- Температурна компензација: Аутоматско подешавање на промене температуре, што смањује утицај термичких деформација на мерење и
- Аутоматско калибрисање: Систем самостално врши калибрацију у одређеним интервалима, чиме се повећава тачност мерења.



Слика 11.5 *Tessa Micro Hite 4-5-4* координатна мерна машина

11.1.1.1 План мерења

Мерења која су рађена на епруветама извршена су у циљу провере геометријске тачности и то паралелности *PARL1*, паралелности *PARL2* и мерења одступања од угла – угловности *ANGL1*, угловности *ANGL2* и угловности *ANGL3*.

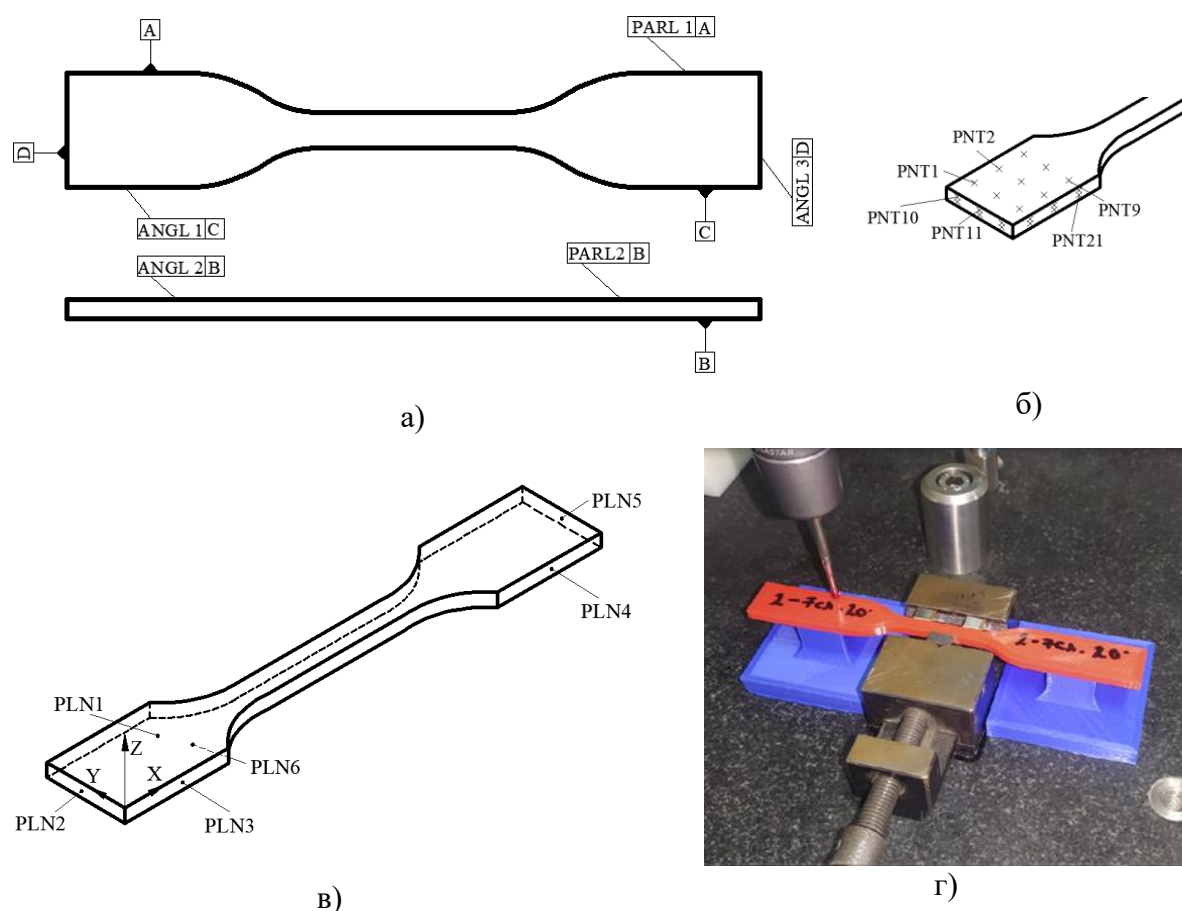
Инспекција епрувета извршена је у софтверу *PC DMIS*, лиценсираном софтверу произвођача координатне мерне машине. Мерење је планирано на основу техничког цртежа приказаном на слици 11.6-а. Површине од интереса су површине *PLN1*, *PLN2*,... и *PLN6* (слика 11.6-в). Равни *A*, *B*, *C* и *D* (слика 11.6-а) послужиле су као референтне равни у случају мерења одступања.

Мерена су следећа одступања:

- Одступање од паралелности PARL1 – равни PLN3 у односу на референтну раван PLN4 – слика 11.6-в (односно референтне равни А – слика 11.6-а),
- Одступање од паралелности PARL2 – равни PLN1 у односу на референтну раван PLN6 – слика 11.6-в (односно референтне равни В – слика 11.6-а),
- Одступање од угловности ANGL1 – равни PLN3 у односу на референтну раван PLN4 – слика 11.6-в (односно референтне равни С – слика 11.6-а),
- Одступање од угловности ANGL2 – равни PLN1 у односу на референтну раван PLN6 – слика 11.6-в (односно референтне равни В – слика 11.6-а) и
- Одступање од угловности ANGL3 – равни PLN5 у односу на референтну раван PLN2 – слика 11.6-в (односно референтне равни D – слика 11.6-а).

Мерења такчака контактом сонде извршена су према матрици приказаној на слици 11.6-б. Тако да су површине од интереса мерене матрицом 3x3 за раван PLN1 и раван PLN6, док су равни PLN2 и PLN3 мерене матрицом 3x2 мерних тачака на основу слике. Обе стране епрувета измерене су по истој, наведеној матрици.

Поступак мерења на координатној мерној машини приказан је на слици 11.6-г.



Слика 11.6 План мерења и процес поступка мерења епрувета

11.1.2 Резултати и дискусија

Резултати испитивања *PLA* епрувета произведених *FDM* техником *3D* штампе, а чији су параметри варирани, приказани су преко табела и дијаграма. Епрувете су штампане у 3 варијанте са променом броја слојева у зиду, и то:

- Са 3 слоја у зиду и остатком испуне,
- Са 5 слојева у зиду и остатком испуне и
- Са 7 слојева у зиду и остатком испуне.

Следећа разлика је у врсти штампања епрувета тј. у углу испуне који је за потребе експеримента вариран од 0 степени са променом на сваких 5 степена, тако да су епрувете штампане под углом од 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 45 степени. За потребе овог истраживања, коришћено је 30 епрувета. Мерења која су рађена на епруветама у циљу провере тачности мера су паралелност *PARL1* (табела 11.2), паралелност *PARL2* (табела 11.3), мерење угла одступања *ANGL1* (табела 11.4), *ANGL2* (табела 11.5) и *ANGL3* (табела 11.6).

Табела 11.2. Вредности одступања од паралелности - *PARL1*

Бр. слојева	Врста одступања	Угао испуне, °									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
3 СЛ	PARL1-1	0.173	0.360	0.069	0.153	0.107	0.008	0.086	0.146	0.198	0.237
	PARL1-2	0.074	0.178	0.632	0.040	0.064	0.079	0.165	0.240	0.256	0.267
	PARL1-3	0.398	0.334	0.281	0.240	0.083	0.186	0.170	0.246	0.408	0.196
	Ср. вред.	0.215	0.291	0.327	0.144	0.085	0.091	0.140	0.211	0.287	0.233
5 СЛ	PARL1-1	0.837	0.827	1.060	1.718	1.253	1.252	1.455	1.028	0.784	0.482
	PARL1-2	0.400	0.402	0.180	0.252	0.029	0.239	0.200	0.180	0.130	0.293
	PARL1-3	1.411	1.363	1.325	1.381	0.514	0.692	1.310	0.595	1.344	0.833
	Ср. вред.	0.883	0.864	0.855	1.117	0.599	0.728	0.988	0.601	0.753	0.536
7 СЛ	PARL1-1	0.120	0.080	0.027	0.049	0.029	0.111	0.039	0.062	0.028	0.070
	PARL1-2	0.375	0.303	0.278	0.333	0.482	0.482	0.517	0.448	0.574	0.588
	PARL1-3	0.081	0.188	0.48	0.137	0.51	0.293	0.078	1.469	0.033	0.045
	Ср. вред.	0.192	0.190	0.262	0.173	0.340	0.295	0.211	0.660	0.212	0.234

Табела 11.3. Вредности одступања од паралелности - *PARL2*

Бр. слојева	Врста одступања	Угао испуне, °									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
3 СЛ	PARL1-1	0.173	0.360	0.069	0.153	0.107	0.008	0.086	0.146	0.198	0.237
	PARL1-2	0.074	0.178	0.632	0.040	0.064	0.079	0.165	0.240	0.256	0.267
	PARL1-3	0.398	0.334	0.281	0.240	0.083	0.186	0.170	0.246	0.408	0.196
	Ср. вред.	0.215	0.291	0.327	0.144	0.085	0.091	0.140	0.211	0.287	0.233
5 СЛ	PARL1-1	0.837	0.827	1.060	1.718	1.253	1.252	1.455	1.028	0.784	0.482
	PARL1-2	0.400	0.402	0.180	0.252	0.029	0.239	0.200	0.180	0.130	0.293
	PARL1-3	1.411	1.363	1.325	1.381	0.514	0.692	1.310	0.595	1.344	0.833
	Ср. вред.	0.883	0.864	0.855	1.117	0.599	0.728	0.988	0.601	0.753	0.536
7 СЛ	PARL1-1	0.120	0.080	0.027	0.049	0.029	0.111	0.039	0.062	0.028	0.070
	PARL1-2	0.375	0.303	0.278	0.333	0.482	0.482	0.517	0.448	0.574	0.588
	PARL1-3	0.081	0.188	0.48	0.137	0.51	0.293	0.078	1.469	0.033	0.045
	Ср. вред.	0.192	0.190	0.262	0.173	0.340	0.295	0.211	0.660	0.212	0.234

Табела 11.4. Вредности одступања од угловности - ANGL1

Бр. слојева	Врста одступања	Угао испуне, о									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
3 СЛ	ANGL1-1	0.317	0.662	0.127	0.281	0.197	0.001	0.158	0.267	0.363	0.434
	ANGL1-2	0.135	0.327	1.159	0.044	0.118	0.144	0.301	0.440	0.470	0.489
	ANGL1-3	0.729	0.611	0.516	0.441	0.152	0.341	0.312	0.451	0.748	0.359
	Ср. вред.	0.394	0.533	0.601	0.255	0.156	0.162	0.257	0.386	0.527	0.427
5 СЛ	ANGL1-1	1.533	1.515	1.941	3.145	2.295	2.293	2.668	1.884	1.435	0.885
	ANGL1-2	0.733	0.738	0.329	0.462	0.018	0.439	0.367	0.330	0.239	0.537
	ANGL1-3	2.212	2.135	2.075	2.164	0.805	1.085	2.051	0.932	2.106	1.305
	Ср. вред.	1.493	1.463	1.448	1.924	1.039	1.272	1.695	1.049	1.260	0.909
7 СЛ	ANGL1-1	0.220	0.147	0.021	0.090	0.020	0.203	0.072	0.114	0.051	0.129
	ANGL1-2	0.688	0.555	0.510	0.610	0.883	0.884	0.949	0.820	1.052	1.079
	ANGL1-3	0.149	0.345	0.879	0.250	0.934	0.536	0.142	1.691	0.060	0.082
	Ср. вред.	0.352	0.349	0.470	0.317	0.612	0.541	0.388	0.875	0.388	0.430

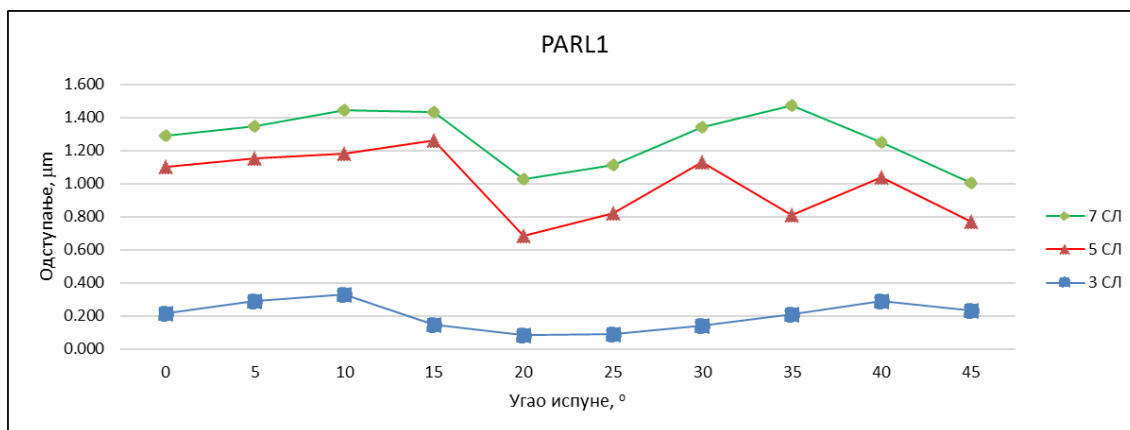
Табела 11.5. Вредности одступања од угловности - ANGL2

Бр. слојева	Врста одступања	Угао испуне, о									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
3 СЛ	ANGL2-1	1.304	1.134	2.401	1.441	1.303	2.052	1.916	1.179	0.735	1.051
	ANGL2-2	0.582	0.108	0.395	0.834	0.086	0.414	1.242	0.179	0.895	0.432
	ANGL2-3	0.289	0.727	0.700	0.776	0.800	0.415	0.145	1.014	0.483	0.521
	Ср. вред.	0.725	0.656	1.165	1.017	0.730	0.960	1.101	0.791	0.704	0.668
5 СЛ	ANGL2-1	0.189	0.209	0.266	0.415	0.368	0.580	0.422	0.685	0.448	0.361
	ANGL2-2	0.090	0.122	0.055	0.210	0.208	0.169	0.234	0.352	0.375	0.516
	ANGL2-3	0.800	0.746	0.931	0.352	1.151	1.619	0.776	0.006	0.974	0.416
	Ср. вред.	0.360	0.359	0.417	0.326	0.576	0.789	0.477	0.348	0.599	0.431
7 СЛ	ANGL2-1	0.635	0.442	0.645	0.385	0.057	0.078	0.149	0.633	1.082	0.976
	ANGL2-2	0.102	0.004	0.039	0.093	0.159	0.223	0.006	0.705	0.031	0.406
	ANGL2-3	0.025	0.482	0.606	0.147	0.171	0.224	0.392	0.776	0.586	0.456
	Ср. вред.	0.254	0.309	0.430	0.208	0.129	0.175	0.182	0.705	0.566	0.613

Табела 11.6. Вредности одступања од угловности - ANGL3

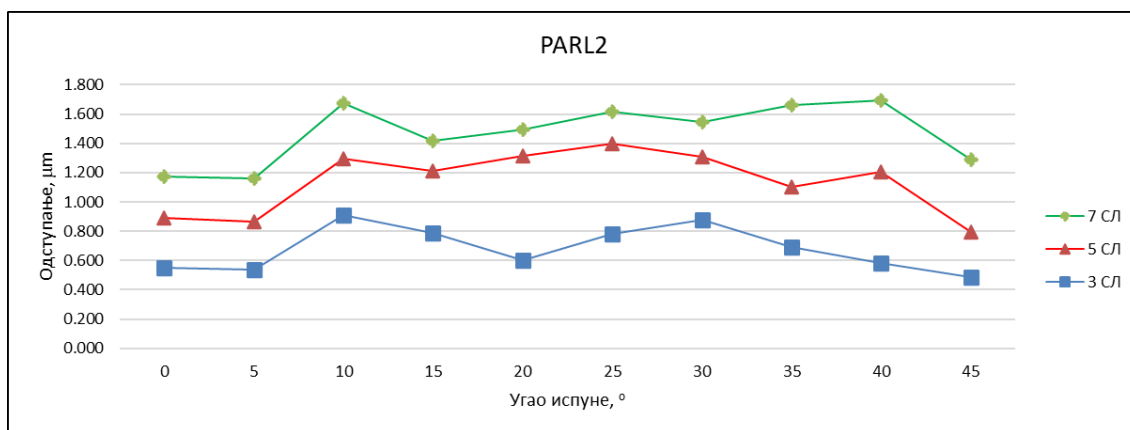
Бр. слојева	Врста одступања	Угао испуне, о									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
3 СЛ	ANGL3-1	0.070	0.051	0.134	0.102	0.103	0.130	0.211	0.392	0.011	0.357
	ANGL3-2	0.021	0.143	0.551	0.434	0.531	0.482	0.743	0.519	0.653	0.579
	ANGL3-3	0.084	0.091	0.148	0.005	0.182	0.032	0.176	0.104	0.316	0.201
	Ср. вред.	0.058	0.095	0.278	0.180	0.272	0.215	0.377	0.338	0.327	0.379
5 СЛ	ANGL3-1	0.169	0.165	0.124	0.760	0.545	0.474	0.852	0.291	0.731	0.496
	ANGL3-2	0.454	0.105	0.231	0.114	0.001	0.176	0.041	0.072	0.219	0.290
	ANGL3-3	0.665	0.829	0.891	0.352	0.439	0.291	0.952	1.022	0.657	0.239
	Ср. вред.	0.429	0.366	0.415	0.409	0.328	0.314	0.615	0.462	0.536	0.342
7 СЛ	ANGL3-1	0.508	0.008	0.187	0.180	0.194	0.132	0.177	0.230	0.034	0.201
	ANGL3-2	0.098	0.381	0.412	0.095	0.370	0.422	0.434	0.388	0.585	0.455
	ANGL3-3	0.373	0.075	0.665	0.028	0.107	0.324	0.432	0.124	0.191	0.327
	Ср. вред.	0.326	0.155	0.421	0.101	0.224	0.293	0.348	0.247	0.270	0.328

Због великог броја мерења и података за исту серију епрувета прорачунате су средње вредности и графички је приказана промена истих величина. Прегледом података и дијаграма за паралелност PARL1 (слика 11.7) види се да су најмања одступања епрувета са 3 слоја у зиду епрувете и да се одступања повећавају са повећањем броја слојева у зиду епрувете. Може се приметити и да је зависност промена углова од угла штампања незнатна.



Слика 11.7 Одступање паралелности PARL1

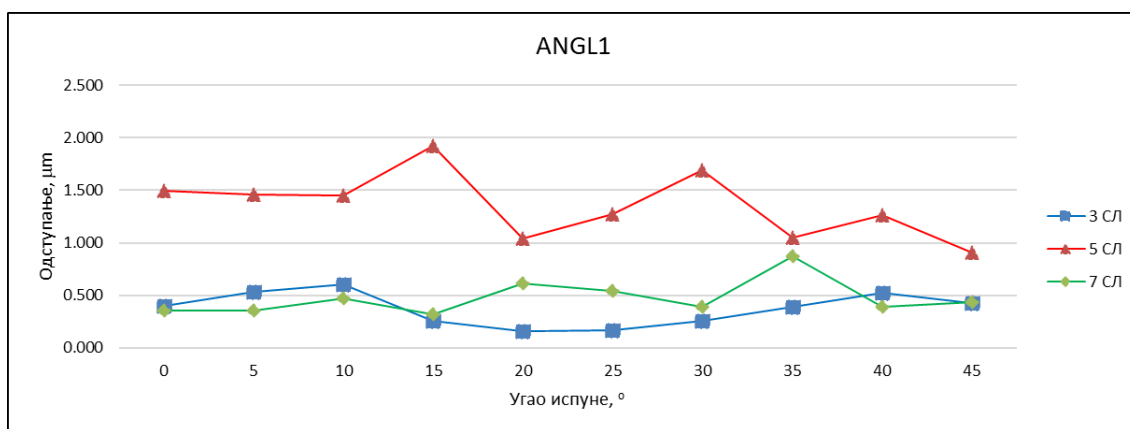
Прегледом података и дијаграма за паралелност PARL2 (слика 11.8), као и у претходном случају, може се видети да су најмања одступања епрувета са 3 слоја у зиду и да се одступања повећавају са повећањем броја слојева у зиду, а зависност промена углова од угла штампања је изузетно мала.



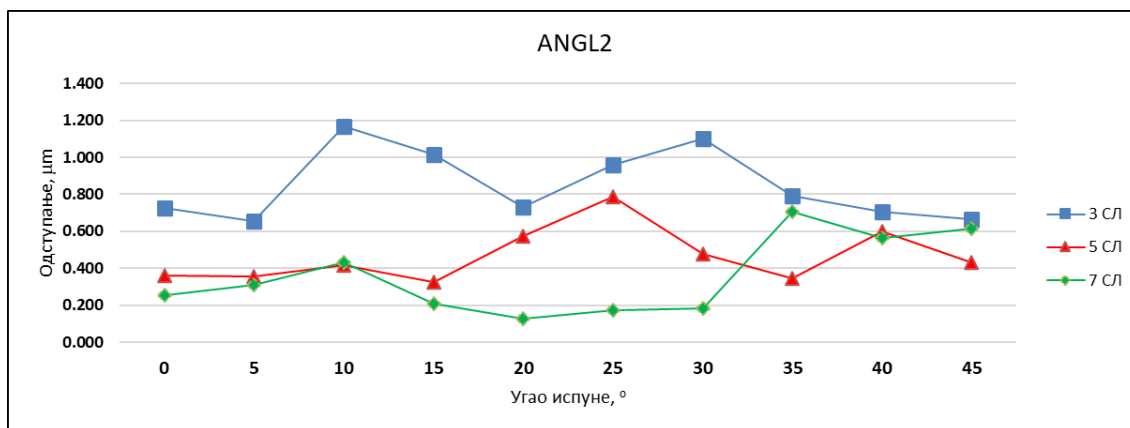
Слика 11.8 Одступање паралелности PARL2

Након анализе података и дијаграма за угловност ANGL1 (слика 11.9) види се неравномерност промена углова у зависности од броја слојева у зиду епрувета. Најмања одступања су код епрувета са 3 слоја у зиду епрувета а највећа код епрувета са 5 слојева у зиду епрувете. Зависност промена углова од угла штампања је мала као и у претходна два случаја.

У дијаграму и подацима за приказ мерења угловности ANGL2 (слика 11.10) види се да су бољи резултати тј. мања одступања углова код епрувета са 7 слојева у зиду као и да се одступања повећавају са смањењем броја слојева.

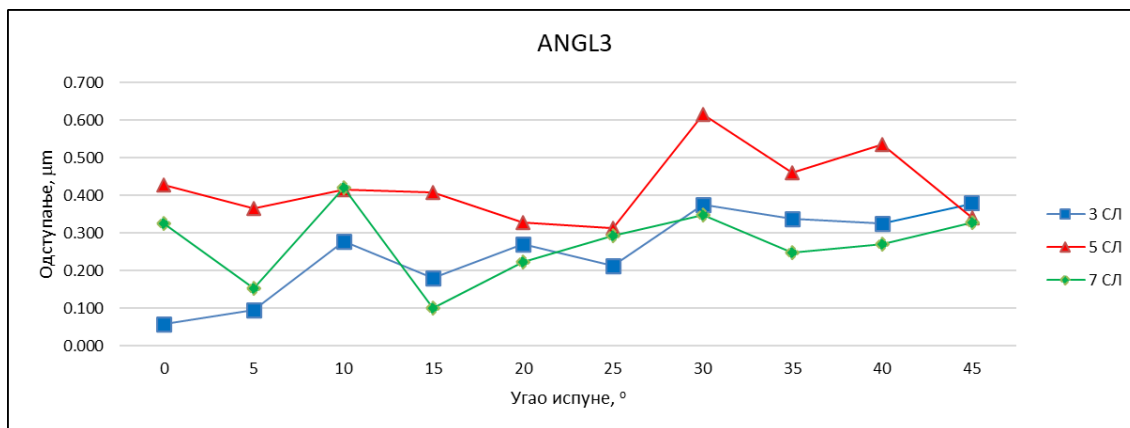


Слика 11.9 Одступање угловности ANGL1



Слика 11.10 Одступање угловности ANGL2

Подаци за угловност ANGL3 који су приказани на дијаграму (слика 11.11), показују да су епрувете са 7 слојева дале мање промене углова у односу на епрувете са 3 и 5 слојева у зиду епрувете.



Слика 11.11 Одступање угловности ANGL3

Промена углова штампања није велика, тј. може се рећи да је занемарљива. Код свих мерења је евидентно да постоје тачке тј. епрувете са већим одступањима што се може приписати условима испитивања и одступањима која као таква треба занемарити.

11.2 Утицај броја слојева у зиду и угла испуне на механичка својства 3D штампаних материјала

Механичка својства материјала представљају један од најбитнијих фактора када се говори о избору адекватног материјала. На основу увида у литературу, у 3D штампаним истраживачима се углавном баве испитивањем 3D штампаних *PLA* и *ABS* материјала појединачно.

Циљ овог истраживања је да се испита утицај услова штампе, односно угао испуне и број слојева у зиду на затезну чврстоћу и упореде три различита материјала.

11.2.1 Материјали, методе и опрема

Узорци који су коришћени у овом експерименту у циљу испитивања затезне чврстоће, техничке спецификације опреме која је коришћена за њихову производњу, као и прецизан опис метода и софтвера, детаљније су описани у поглављу 11.1.

Испитивања затезне чврстоће на узорцима ради утврђивања њихових механичких својстава вршена су на *Shimadzu* EHF EV101K3-070-0A серво-хидрауличкој машини за испитивање произведеној од стране *Shimadzu Corporation*, Токио, Јапан (слика 11.12-а) са снагом од ± 100 kN и ходом од ± 100 mm, која се налази на Факултету Инжењерских Наука Универзитета у Крагујевцу. Затезна чврстоћа је испитивана брзином од 5 mm/min. На слици 11.12-б може се видети поступак испитивања затезне чврстоће. У циљу испитивања поновљивости мерења при испитивању затезања, због великог броја епрувета, испитивање затезања сва 3 примерка штампана у истим условима, обављено је на неколико примерака где су добијена одступања мања од 3 %, тј. грешка мерења.



а)

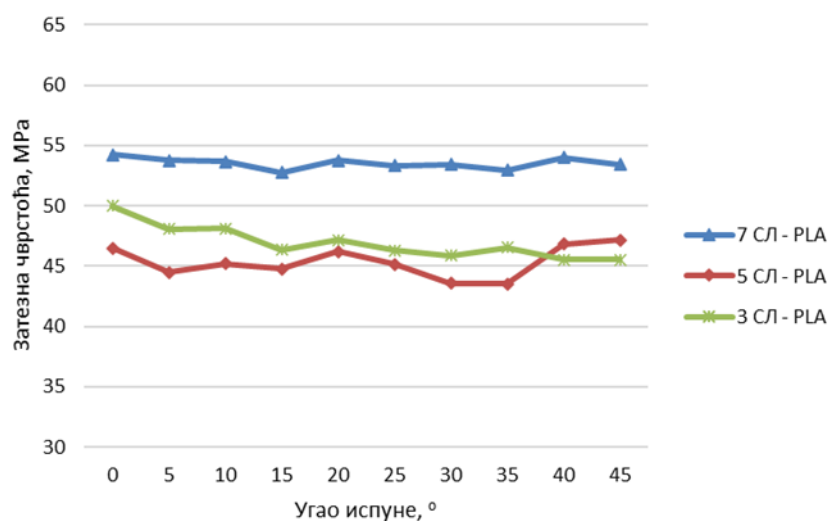


б)

Слика 11.12 Серво-хидраулична машина за испитивање затезне чврстоће *Shimadzu* тип *EHF* *EV101K3-070-0A* – а и процес кидања - б

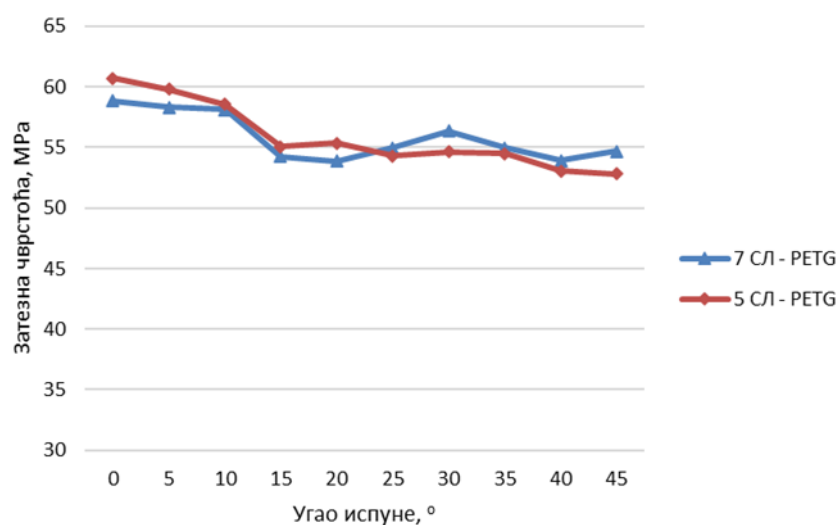
11.2.2 Резултати и дискусија

За узорке направљене од *PLA* материјала, са слике 11.13, 3 слоја (3 СЛ *PLA*) у зиду дају највећу затезну чврстоћу са најмањим углом испуне од 0° (50 МПа), док узорци са највећим углом испуне (40° - 45°) имају најмању затезну чврстоћу (45.5 МПа). За узорке са 5 слојева у зиду (5СЛ *PLA*) види се да угао испуне нема значајног утицаја на затезну чврстоћу и највећи је 47.2 МПа, док је најмањи 43.5 МПа. За 7 слојева у зиду (7СЛ *PLA*) може се видети да угао испуне такође има мали утицај на затезну чврстоћу, док са повећањем угла испуне затезна чврстоћа има благи пад. Највећа затезна чврстоћа је 54.2 МПа, а најмања 52.8 МПа.



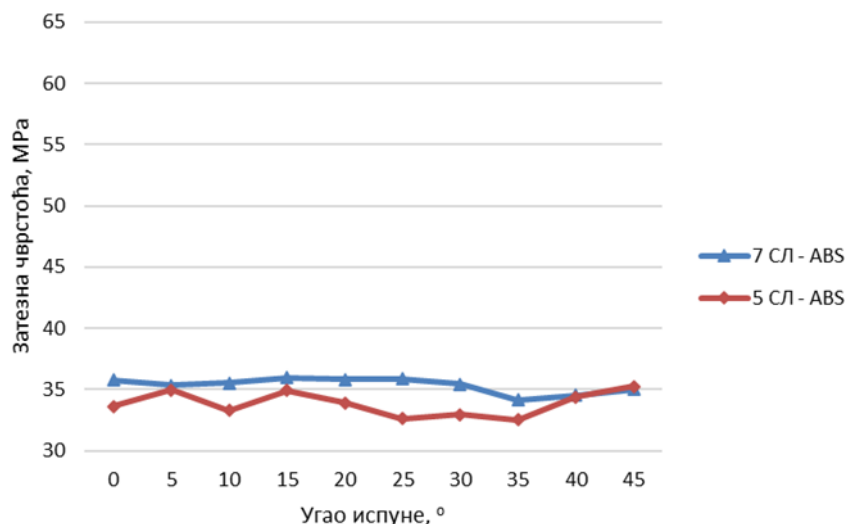
Слика 11.13 Дијаграм затезни напон-угао испуне за *PLA* материјал са 3, 5, 7 слојева у зиду

За *PETG* узорке (слика 11.14) може се видети да је код 5 слојева у зиду највећа затезна чврстоћа са углом испуне од 0° (60.702 МПа), док је најмања са углом испуне од 45° (52.804 МПа). У случају 7 слојева у зиду, највећа затезна чврстоћа је са углом испуне од 0° (58.839 МПа), а најмања са углом испуне од 20° (53.849 МПа).



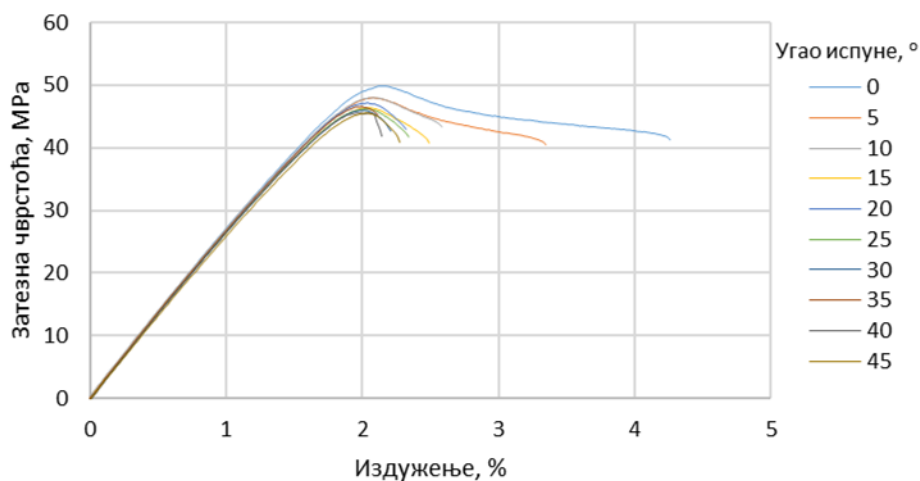
Слика 11.14 Дијаграм затезни напон-угао испуне за *PETG* материјал са 5 и 7 слојева у зиду

У случају *ABS* узорака (слика 11.15) може се видети да се са 5 слојева у зиду (5СЛ *ABS*) затезна чврстоћа креће од граница од 32.5 МПа до 35.3 МПа и тренд промене се не може уочити. Са 7 слојева у зиду (7СЛ *ABS*), затезна чврстоћа благо опада са повећањем угла испуне и креће се од 35.9 МПа за најмање углове испуне до најмањих вредности од 34.2 до 35 МПа.



Слика 11.15 Дијаграм затезни напон-угао испуне за *ABS* материјал са 5 и 7 слојева у зиду

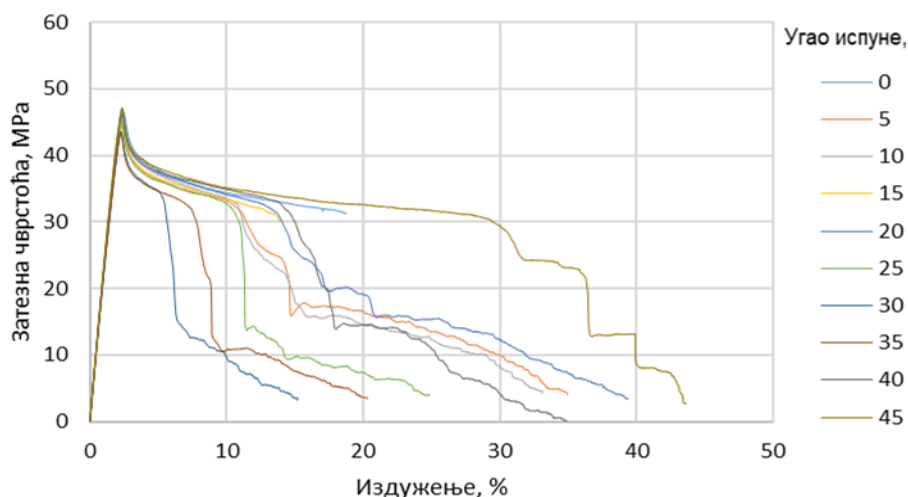
На слици 11.16 приказан је дијаграм сила-издужење узорка од *PLA* материјала са 3 слоја са променом угла испуне од 0° до 45°. Из дијаграма се види да промена угла испуне не утиче на издужење епрувета, док благо утиче на промену затезне чврстоће.



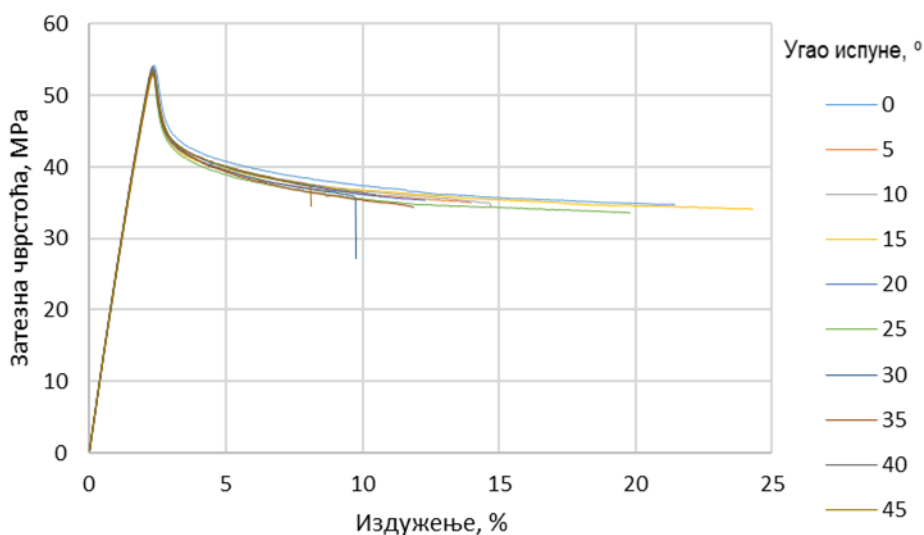
Слика 11.16 Дијаграм сила-издужење *PLA* са 3 слоја у зиду

На слици 11.17 приказани су дијаграми сила-издужење узорака од свих материјала са 5 слојева у зиду и углом испуне од 0°. Из дијаграма се види понашање епрувета при истезању, као и утицај броја слојева зида на издужење. Код узорака са 5 слојева у зиду највеће издужење су показале *PLA* епрувете, затим *PETG*, док је најмањи био код епрувета од *ABS* материјала. Сличан тренд је приказан и код епрувета са 7 слојева (слика 11.18), с том разликом што су највеће издужење показали узорци од *PETG* материјала, затим *PLA* узорци, док су узорци од *ABS* материјала поново показали

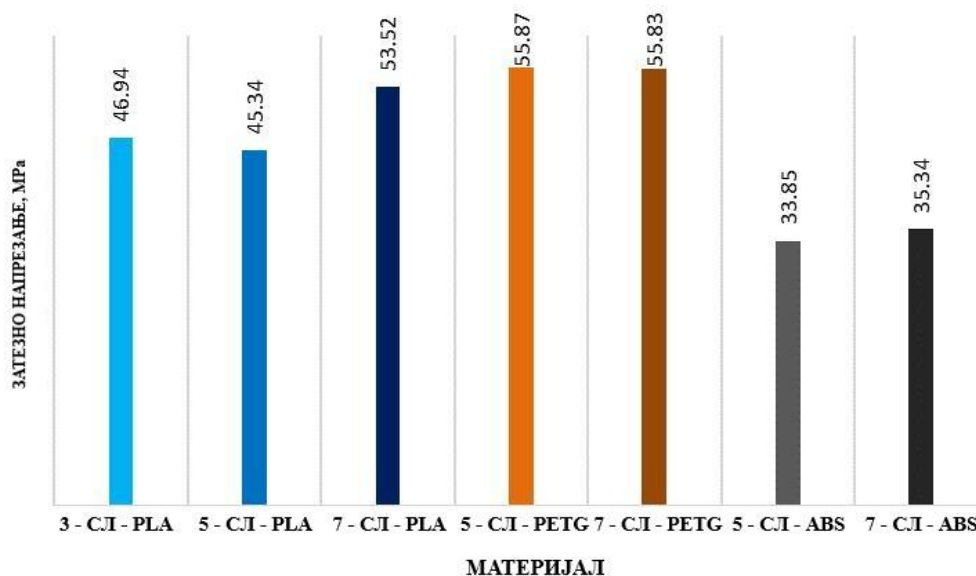
најмање издужење. Издужење код *PETG* и *PLA* епрувета је значајно веће, док је код *ABS* епрувета приближно исто у односу на примерке са 5 слојева. Из резултата се види да је просечна вредност затезне чврстоће *ABS* материјала у односу на *PETG* за 39.4 % нижа за узорке са 5 слојева у зиду, док је за епрувете са 7 слојева у зиду нижа за 36.7 %. Просечна затезна чврстоћа за епрувете од *PLA* материјала је нижа од *PETG* за 54.6 % са пет слојева у зиду и 46.5 % нижа за узорке са 7 слојева. Просечна затезна чврстоћа *ABS* материјала је 25.3 % нижа за узорке са 5 слојева у зиду и 34 % нижа за епрувете са 7 слојева у зиду у поређењу са *ABS* материјалом. Слика 11.19 представља затезну чврстоћу за све материјале.



Слика 11.17 Дијаграм сила-издужење за епрувете са 5 слојева у зиду



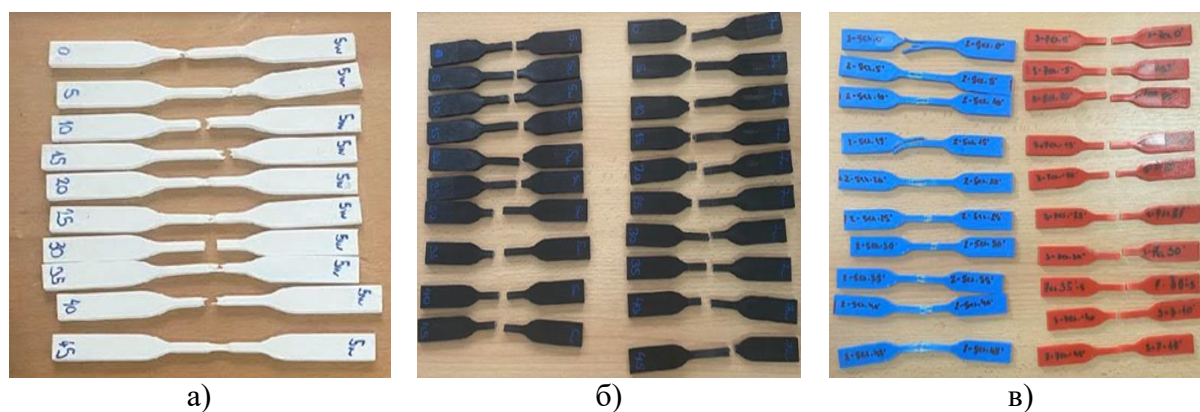
Слика 11.18 Дијаграм сила-издужење за епрувете са 7 слојева у зиду



Слика 11.19 Просечна затезна чврстоћа за све епрувете

На слици 11.20 приказане су све епрувете након испитивања затезања. Епрувете израђене од *ABS* материјала су углавном покидани у једном делу, док постоји и изванредан број епрувета које су се раслојиле и издужиле (слика 11.20-а). Све *PETG* епрувете су покидане у централном делу ближе једној од чељусту машине за испитивање затезања (слика 11.20-б). Код највећег броја *PLA* епрувета није дошло до кидања, али је дошло до деламинације и издужења (слика 11.20-в).

Што се тиче материјала, *PETG* материјал је имао највећу затезну чврстоћу. Нешто мања затезна чврстоћа је постигнута код *PLA* материјала, док је *ABS* материјал имао најмању затезну чврстоћу.



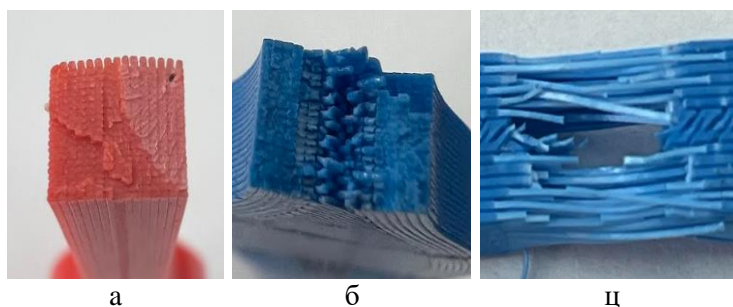
Слика 11.20 Узорци након кидања

Један од разлога за ове резултате је то што су епрувете са 7 слојева биле потпуно испуњене слојевима у зиду у централном делу (слика 11.21-а). Уздужни слојеви су повезани већом адхезионом силом, па су епрувете биле компактно испуњене у површини попречног пресека и добијена је максимална затезна чврстоћа (53.52 МПа).

Код епрувета са 5 слојева простор за испуну је био недовољан, тако да није постигнута добра међусобна повезаност унутрашње испуне и слојева у зиду. Приликом

испитивања добијен је некомпактан попречни пресек, што је довело до раслојавања и уздужног и слоја испуне. Ово је резултирало најнижом затезном чврстоћом (45.34 МПа) (слика 11.21-в).

Код епрувета са 3 слоја у централном делу остаје довољно простора да се добро попуни унутрашњим слојевима (слика 11.21-б). Формирана је добра адхезиона веза између уздужних слојева и слојева испуне, што је дало добру компактност попречног пресека. На дијаграму је приказана већа вредност затезне чврстоће (46.94 МПа) у односу на епрувете са 5 слојева.



Слика 11.21 *PLA* епруветр са 7 слојева у зиду након испитивања затезне чврстоће (а), 3 слоја у зиду (б), и 5 слојева у зиду (в)

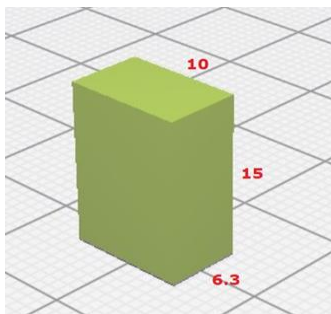
11.3 Триболошке карактеристике и површинска храпавост *3D* штампаног *ABS* материјала

Триболошке карактеристике и површинска храпавост имају велику улогу у процени квалитета и перформанси *3D* штампаних делова. Како је *3D* штампа заснована на додавању материјала слој по слој, површинска храпавост и трење између компоненти могу значајно утицати на функционалност и дуговечност делова. Разумевање ових карактеристика постаје све важније у индустријским применама где се захтева висок ниво прецизности и поузданости.

11.3.1 Материјали, методе и опрема

Узорци за мерење храпавости површине и триболошких карактеристика штампани су на *Creality CR 10-s 3D* штампачу (слика 11.1), чије су карактеристике и опис дати у поглављу 11.1.1.

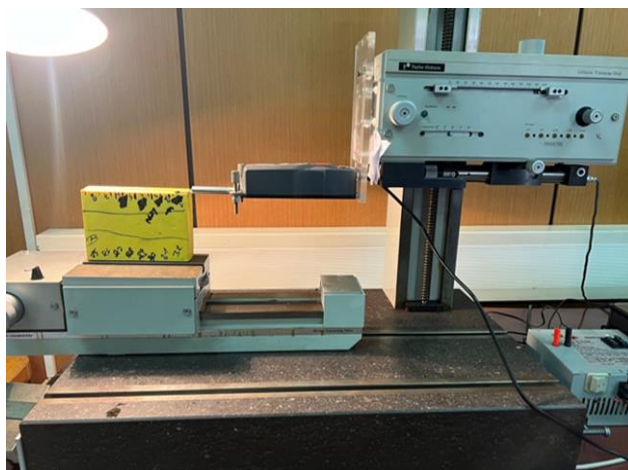
Пет узорака је обрађено у софтверу *Ultimaker Cura* (слика 11.22), а затим одштампано *ABS* материјалом. Димензије су биле 10x6.3x15 mm, густина испуне 100 %, брзина штампања 60 mm/s, температура штампања 240 °C, температура уградне плоче 80 % и хлађење је омогућено.

Слика 11.22 Узорак у *Ultimaker Cura* софверу

Средња аритметичка храпавост (R_a) узета је као параметар храпавости површине и мерен на свих пет узорака, који су претходно били подвргнути одређеним врстама обраде, као што су:

- Глодање,
- Полирање,
- Брушење,
- Третман ацетоном и
- Без обраде.

Храпавост површине је мерена на компјутеризованом мерном уређају *Talysurf-6* (слика 11.23) са мерним уређајем *ISR-C002 INSIZE* повезаним са рачунаром. Основни подаци о уређају: димензије уређаја су 141x55x40 mm, опсег мерења 160 μm , прецизност мерења $\pm 10\%$, резолуција 0.01 μm , брзина померања 0.02 “/s, 0.04 “/s, мерење 21 параметара храпавости. Триболошке карактеристике *ABS* материјала су мерене на "Блок-на-диску" трибометар *TPD-95*.

Слика 11.23 Уређај за мерење храпавости *Talysurf-6*

11.3.2 Резултати и дискусија

Након израде узорака на *3D* штампачу, 4 модела су изложена одређеној врсти обраде, док је један примерак мерен без претходне обраде. Мерење је вршено на средини

површине узорака. Измерене вредности храпавости површине Ra приказане су у табели 11.7.

Табела 11.7 Тип обраде и измерене вредности

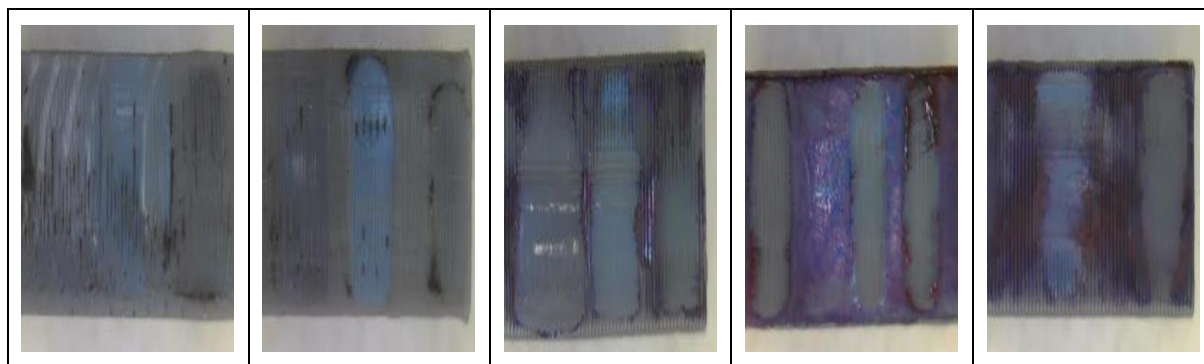
Тип обраде	$Ra, \mu\text{m}$
Глодање	2.456
Полирање	0.498
Брушење	6.715
Третман ацетоном	0.443
Без обраде	13.315

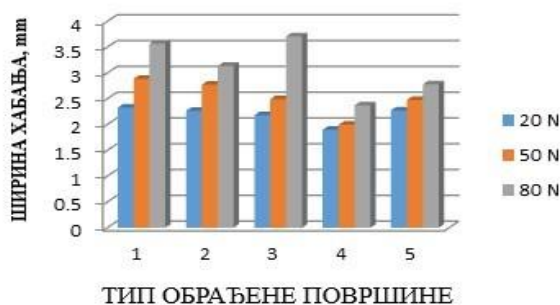
Након анализе резултата храпавости површине, можемо закључити да се ради о додатној обради јер је највећа храпавост управо на узорку без обраде. Третман ацетоном, полирање као и глодање, значајно су побољшали квалитет површине.

Триболошке вредности, односно хабање и трење, мерене су на *TPD-95* трибометру Блок на Диску. Нормално оптерећење је било 20, 50 и 80 N, а брзина клизања је била 0.75 m/s. Укупан пут проклизавања је био 150 mm. Ширина хабања је мерена на *UIM-21* микроскопу, резултати су дати у табели 11.8, док су у табели 11.9 приказане истрошене површине испитаних узорака. Са слике 11.24 се види да се са повећањем оптерећења ширина хабања узорака повећава на свакој врсти обрађене површине. Из табеле 11.10, као и са слика 11.25 и 11.26, видимо да са повећањем оптерећења коефицијент трења опада.

Табела 11.8 Узорци хабања, mm

F_n, N	1	2	3	4	5
20	2.329	2.264	2.18	1.9	2.275
50	2.883	2.772	2.492	1.995	2.478
80	3.571	3.135	3.71	2.371	2.78

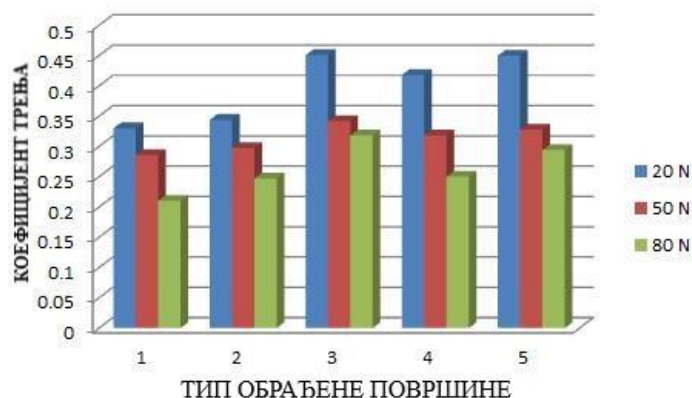
Табела 11.9 Узорци хабања, $v=0.75 \text{ m/s}$ 



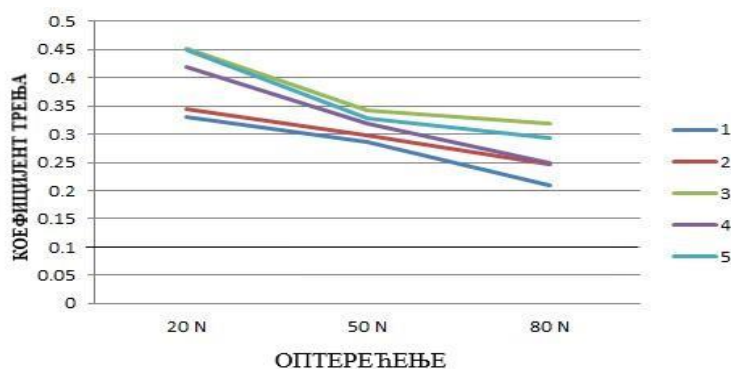
Слика 11.24 Ширина хабања са различитим оптерећењем

Табела 11.10 Коефицијент трења у зависности од оптерећења и врсте обраде

F_n	1	2	3	4	5
20 N	0.33	0.344	0.451	0.418	0.45
50 N	0.286	0.297	0.342	0.318	0.328
80 N	0.21	0.247	0.318	0.25	0.294



Слика 11.25 Коефицијент трења за различите врсте обраде



Слика 11.26 Коефицијент трења са различитим оптерећењем

11.4 Моделирање и предвиђање храпавости површине у хибридном производном процесу коришћењем вештачких неуронских мрежа

Моделирање и предвиђање храпавости површине у хибридном производном процесу представља изазован задатак због сложених интеракција између различитих параметара обраде. Хибридни производни процеси комбинују две или више

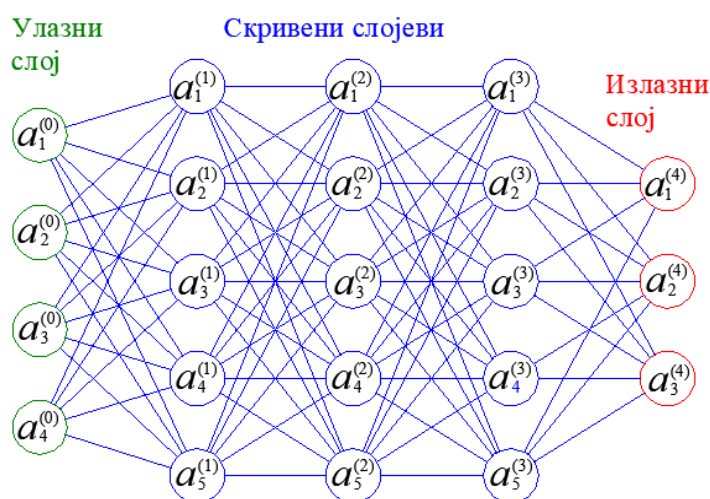
технологија како би се добио оптимални квалитет површине и повећала ефикасност производње. У оваквим процесима, предвиђање површинске храпавости игра кључну улогу у постизању жељених перформанси, посебно када се користе методе као што су вештачке неуронске мреже.

11.4.1 Материјали, методе и опрема

Математички модел или рачунарски модел који је инспирисан карактеристикама и структуром биолошких неуронских мрежа познат је као вештачка неуронска мрежа (*ANN*), а понекад и као неуронска мрежа (*NN*). *ANN* су моћни, паралелно повезани процесори који имају природну способност да прикупљају знање из експерименталних података и користе то знање на сличан начин као људски мозак.

Трослојна структура је присутна у неуронској мрежи (као што је илустровано на слици 11.27). Улазни слој, који директно комуницира са спољним окружењем, је први слој. Други слој се састоји од скривених јединица где се прорачуни изводе на основу дате функције, а последњи слој је излазни слој који генерише излаз. Знање у неуронским мрежама се чува као синаптичке тежине између неурона. Улазни подаци се преносе од слоја до слоја кроз мрежу док се не произведу излазни подаци. Ако је мрежа вишеслојни перцептрон који користи алгоритам повратног ширења, а излаз се разликује од жељеног излаза, грешка се израчунава и шири назад кроз мрежу. Како се грешка шири, синаптичке тежине се мењају. У поређењу са статистичким методама, анализа *ANN* је флексибилнија у смислу количине и природе података о обуци (експерименталних), омогућавајући коришћење мање формалних експерименталних дизајна.

Сваки слој у неуронској мрежи има вектор активације, а на тачност мреже могу утицати параметри као што су подаци о обуци, брзина учења и број итерација и скривених слојева.



Слика 11.27 Структура *ANN*

Улазни слој је означен са $a^{(0)}$, а излазни слој је означен са $a^{(n)}$. Сви слојеви који постоје између улазног и излазног слоја сматрају се скривеним слојевима. Активација улазног

слоја је идентична као и улаз. Сваком односу између неурона је додељена јединствена тежина, представљена са "w". За израчунавање излазног слоја користи се алгоритам ширења унапред, док се алгоритам ширења уназад користи за обуку.

Функције активације играју кључну улогу у вештачким неуронским мрежама, јер олакшавају учење и разумевање сложених, нелинеарних односа између улазних и излазних података. У вештачкој неуронској мрежи (ANN), излаз сваког слоја се израчунава узимањем укупности производа улаза и њихових одговарајућих тежина, након чега следи примена функције активације. Овај излаз се затим прослеђује као улаз следећем слоју у мрежи. Тачност предвиђања неуронске мреже зависи од броја коришћених слојева и типа активационе функције која се користи. Неуронска мрежа без активационих функција делује као модел линеарне регресије са ограниченим перформансама. Функција активације мора бити диференцибилна да би укључила пропацију уназад за процену грешке, и коначно, оптимизацију тежине. Постоји велики број активационих функција, од којих су најпознатије бинарне, линеарне, сигмоидне, *tanh*, *ReLU*, експоненцијалне итд.

Ректификована линеарна јединица, или *ReLU* (слика 11.28-а), има функцију деривата, иако даје утисак линеарне функције. Главна предност *ReLU* функције је у томе што не активира све неуроне истовремено. Да би неурон био деактивиран, излаз линеарне трансформације мора бити испод нуле. Другим речима, неурон ће се деактивирати само када је излаз линеарне трансформације тачно нула. Ово се математички може описати једначином (1):

$$g(Z) = \max(0, Z) \quad (1)$$

Tanh, скраћеница од хиперболичке тангенте, је математичка функција која дели сличности са сигмоидном функцијом. Међутим, за разлику од сигмоидне функције, *tanh* је симетричан око почетка. Ова симетрија доводи до тога да се различити знаци излаза из претходних слојева обезбеђују као улаз за следећи слој. Математички, *tanh* се може описати једначином (2):

$$g(Z) = \frac{e^Z - e^{-Z}}{e^Z + e^{-Z}} \quad (2)$$

Функција хиперболичке тангенте (*tanh*) је константна и диференцибилна функција чије излазне вредности се крећу од -1 до 1 (слика 11.28-б).



Слика 11.28 Активационе функције: (а) *ReLU* активациона функција; (б) *tanh* активациона функција.

Техника моделирања која је корак даље од једноставне регресије је анализа вишеструке регресије. У анализи вишеструке регресије, кључна разлика од једноставне регресије лежи у укључивању две или више независних променљивих (такође познатих као предикторске варијабле) у модел, за разлику од само једне. Постоје два примарна облика регресије која укључује више независних варијабли:

- Један корак или стандард: Сви предиктори заједно улазе у регресију и
- Хијерархијски или секвенцијални: Сваки блок дефинише један корак, а сви предиктори су уграђени у блокове.

Овај статистички метод је свестран у својој способности да анализира различите типове података, као што су категоријални, редни или интервални подаци, и нуди процене важности и интензитета веза између варијабли. За предвиђање храпавости површине коришћењем предикторских варијабли као што су брзина помака, дубина резања и брзина вретена, анализа вишеструке регресије може бити веома корисна. Једначина другог реда (3), за предвиђање храпавости површине, може се изразити на следећи начин:

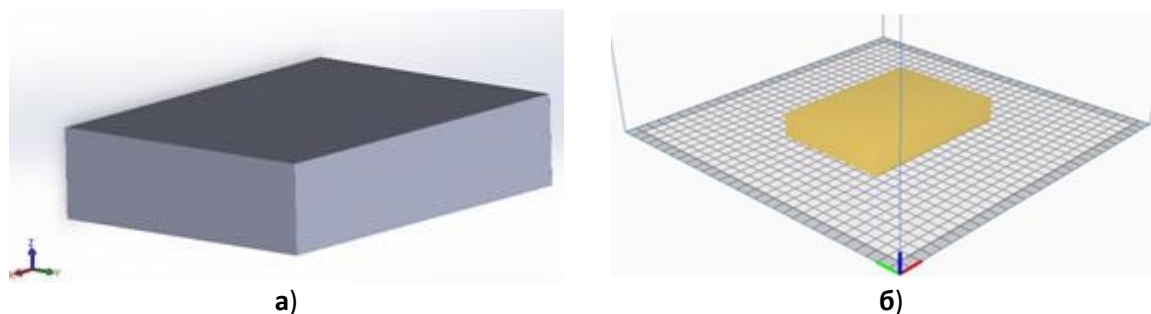
$$R_a = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_9 \end{bmatrix} \times [1 \ n \ V_f \ a_p \ n^2 \ n * V_f \ n * a_p \ V_f^2 \ V_f * a_p \ a_p^2] \quad (3)$$

Трећи ред се може изразити као једначина (4):

$$R_a = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{19} \end{bmatrix} \times [1 \ n \ V_f \ a_p \ n^2 \ n * V_f \ n * a_p \ V_f^2 \ V_f * a_p \ a_p^2 \ n^3, n^2 * V_f \ n^2 * a_p \ n * V_f^2 \ n * V_f * a_p \ n * a_p^2 \ V_f^3 \ V_f^2 \cdot a_p \ n * a_p^2 \ a_p^3] \quad (4)$$

Једначина за R_a укључује процењену храпавост површине, при чему V_f представља брзину помоћног кретања, n као брзину вретена и a_p као дубину резања. Да би се добили коефицијенти за једначину другог реда, $\theta_0, \theta_1, \theta_2 \dots \theta_9$, и за једначину трећег реда, $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_{19}$, морају се користити одговарајуће методе за процену.

3D CAD модел радног комада је моделован у *Solidworks 15x64 edition CAD* софтверу (слика 11.29-а), сачуван као *STL* датотека и увезен у софтвер *Ultimaker Cura 4.11.0*, где је густина испуне промењена на 100 % и оријентација градње је била равна (слика 11.29-б) За штампање радног предмета коришћен је *PLA* материјал. Радни комад је штампан помоћу *Creality CR10-s 3D* штампача.



Слика 11.29 Радни комад: (а) CAD софтвер; (б) Ultimaker Cura софтверу

Машина коришћена за машинску обраду била је вертикална глодалица *Haas VF-3SS* а три CNC- управљане осе (слика 11.30), која се налази на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Ова вертикална глодалица има осу ротације у правцу Z , док X оса представља дужину радног стола, а Y оса је поравната са кретањем стола напред и назад. Сва померања осовина обезбеђују спирална вретена са навртком. Контролна јединица за *HAAS VF-3SS* је *HAAS 2*. Карактеристике *Haas VF-3SS* вертикална глодалица су следеће: X - Y - Z опсег оса: 1016–508–635 mm; максимални број обртаја: 12000 o/min; максимална брзина помоћног кретања: 21.1 m/min; максимална снага: 22.4 kW. Алат који се користио за машинску обраду био је вретенасто глодало са 3 зуба и пречником од 6 mm од тврдог метала (*VHM*), као што је приказано на слици 11.31.



Слика 11.30 HAAS VF-3SS глодалица



Слика 11.31 Вретенасто глодало VHM 6

Мерење хрпавости површине извршено је са *TALYSURF-6* мерним системом који је приказан на слици 11.22 у поглављу 11.3.

11.4.2 Резултати и дискусија

Параметри учења који су коришћени наведени су у табели 11.11 како би се конструисали предиктивни моделе користећи вештачке неуронске мреже (*ANN*). Овај модел је користио две функције активације, наиме *Tanh* и *Relu*, и још пет различитих структура: 5-S-T, 5-S-R, 7-S-R, 10-S-R и 5x2-S-R.

Параметри који се односе на хрпавост обично зависе од фактора као што су услови производње. За ову конкретну студију изабране су три примарне варијабле: број обртаја (n), брзина помоћног кретања (V_f), и дубина резања (ap). Подаци из 48 експеримената спроведених на машинској обради *PLA* материјала су прикупљени и приказани у табели 11.12, док се у наставку упоређују и разматрају резултати добијени вештачким неуронским мрежама (*ANN*) и анализом вишеструке регресије (*MRA*).

Табела 11.11 Параметри учења

Параметри	Опис
Број слојева	3 и 4
Број неурона на слојевима	Улазни 3, Скривени 5, 7, 10, 5x2, Излазни 1
Почетне тежине и пристрасности	Насумично између 0 и +1
Активациона функција	<i>Relu</i> и <i>Tanh</i>
Стопа учења	0.03
Нормализација података	Од -0.5 до +0.5
Нормализација података	10,000–30,000

Табела 11.12 Експериментални подаци за конструкцију модела

Тест бр.	N , [o/min]	V_f , [mm/min]	ap , [mm]	Ra , [μ m]
1	3000	400	0.3	2.058
2	3000	400	0.6	2.845
3	3000	400	1	2.41
4	3000	600	0.3	2.108
5	3000	600	0.6	3.18
6	3000	600	1	2.601
7	3000	800	0.3	2.5
8	3000	800	0.6	2.901
9	3000	800	1	2.989
10	3000	1000	0.3	2.861
11	3000	1000	0.6	3.111
12	3000	1000	1	3.261
13	4000	400	0.3	3.012
14	4000	400	0.6	2.606
15	4000	400	1	3.097
16	4000	600	0.3	2.759
17	4000	600	0.6	2.611
18	4000	600	1	2.905
19	4000	800	0.3	2.891
20	4000	800	0.6	2.519
21	4000	800	1	3.422
22	4000	1000	0.3	2.953
23	4000	1000	0.6	2.802
24	4000	1000	1	3.233
25	5000	400	0.3	2.595
26	5000	400	0.6	1.958
27	5000	400	1	2.648
28	5000	600	0.3	2.87
29	5000	600	0.6	2.314
30	5000	600	1	2.674
31	5000	800	0.3	2.557
32	5000	800	0.6	2.082
33	5000	800	1	3.161
34	5000	1000	0.3	3.236
35	5000	1000	0.6	2.928
36	5000	1000	1	3.435
37	6000	400	0.3	3.256
38	6000	400	0.6	2.585
39	6000	400	1	3.034
40	6000	600	0.3	2.304
41	6000	600	0.6	2.413
42	6000	600	1	2.286
43	6000	800	0.3	2.313
44	6000	800	0.6	2.537
45	6000	800	1	2.482
46	6000	1000	0.3	2.927
47	6000	1000	0.6	2.769
48	6000	1000	1	2.856

Након што је мрежа успешно обучена, коефицијент детерминације (R^2) је коришћен као критеријум за поређење резултата, као што је представљено у једначини (5).

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (\hat{y}_i)^2} \right) \quad (5)$$

где y представља измерену (тачну) вредност док \hat{y} представља добијене резултате. Активационе функције које су коришћене у овом истраживању су *ReLU* и *Tanh*. *ANN* модел је развијен користећи програм *Python 3.10* алгоритам пропагације грешке уназад. Модел вишеструке регресионе анализе направљен је на основу параметара из табеле 11.6, а програм који је коришћен за процену коефицијената за једначину другог реда ($\Theta_0, \Theta_1 \dots \Theta_9$) и једначина трећег реда ($\Theta_0, \Theta_1 \dots \Theta_{19}$) био је *PYTHON-3.10*. Једначина (6) даје модел другог реда:

$$R_a = \begin{bmatrix} 1.81033874e + 00 \\ 7.51080270e - 04 \\ -2.34809595e - 03 \\ -8.87987412e - 01 \\ -5.58541667e - 08 \\ -2.49050000e - 07 \\ -1.89841216e - 04 \\ 2.65468750e - 06 \\ 5.38631757e - 04 \\ 1.27641369e + 00 \end{bmatrix} x[1 \ n \ V_f \ a_p \ n^2 \ na_p \ V_f^2 \ V_f a_p \ a_p^2] \quad (6)$$

А модел трећег реда је приказан једначином (7):

$$R_a = \begin{bmatrix} -4.50556984e + 01 \\ 5.95991324e - 03 \\ 6.06482958e - 03 \\ 2.25539937e + 02 \\ -1.06164454e - 06 \\ -1.82648851e - 06 \\ -1.75941348e - 03 \\ -5.35423846e - 06 \\ 3.16716023e - 03 \\ -3.91033080e + 02 \\ 8.32361111e - 11 \\ -1.20458333e - 10 \\ -5.30152027e - 08 \\ 1.87937500e - 09 \\ 4.80608109e - 08 \\ 1.52943452e - 03 \\ 4.87847225e - 10 \\ -2.32538007e - 06 \\ 3.12053572e - 04 \\ 2.02741369e + 02 \end{bmatrix} x[1nV_f a_p n^2 nV_f na_p V_f^2 V_f a_p a_p^2 n^3 n2V_f n2a_p nV_f^2 nV_f a_p na_p^2 V_f^3 V_f^2 a_p na_p^2 a_p^2] \quad (7)$$

Истраживање је спроведено коришћењем експерименталног дизајна за проучавање утицаја параметара резања као што су брзина вретена, брзина помака и дубина сечења на храпавост површине. Мерења су снимљена након завршетка операције глодања. Уз помоћ експерименталних података, развијени су и *ANN* и *MRA* модели за предвиђање

храпавости површине. У табели 11.13 приказане су измерене вредности храпавости према вредностима добијеним помоћу *ANN* and *MRA* models.

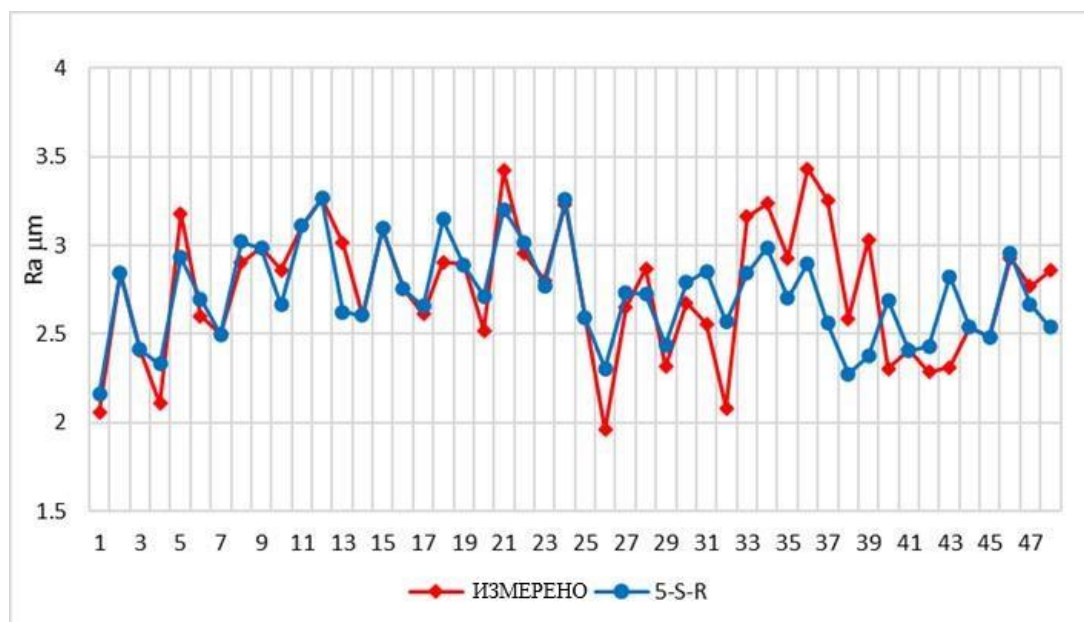
Табела 11.13 Добијени резултати површинске храпавости Ra [μm].

Тест бр.	Измерено	RA-2	RA-3	5-S-R	10-S-R	5-S-T	5x2-S-R
1	2.058	2.490	2.320	2.164	2.318	2.056	2.056
2	2.845	2.462	2.553	2.843	2.552	2.801	2.575
3	2.41	2.782	2.552	2.412	2.414	2.407	2.774
4	2.108	2.434	2.416	2.330	2.413	2.105	2.166
5	3.18	2.438	2.725	2.932	2.818	2.716	2.741
6	2.601	2.802	2.843	2.697	2.703	2.641	2.940
7	2.5	2.591	2.549	2.497	2.628	2.510	2.497
8	2.901	2.627	2.878	3.022	2.904	2.920	2.907
9	2.989	3.034	3.041	2.982	2.992	2.987	3.106
10	2.861	2.960	2.743	2.663	2.843	2.855	2.811
11	3.111	3.029	3.036	3.111	3.113	3.107	3.111
12	3.261	3.478	3.169	3.267	3.267	3.259	3.272
13	3.012	2.693	2.665	2.623	2.525	3.010	2.643
14	2.606	2.608	2.678	2.604	2.487	2.872	2.452
15	3.097	2.853	2.811	3.094	2.814	2.724	2.652
16	2.759	2.588	2.606	2.755	2.663	2.630	2.769
17	2.611	2.535	2.697	2.659	2.652	2.669	2.618
18	2.905	2.822	2.954	3.149	2.943	2.840	2.817
19	2.891	2.694	2.734	2.887	2.783	2.747	2.893
20	2.519	2.674	2.849	2.714	2.819	2.849	2.784
21	3.422	3.005	3.153	3.203	3.110	3.115	2.983
22	2.953	3.014	3.074	3.019	2.964	2.974	3.018
23	2.802	3.026	3.155	2.768	2.987	3.060	2.949
24	3.233	3.399	3.434	3.258	3.277	3.336	3.149
25	2.595	2.785	2.757	2.592	2.602	2.963	2.601
26	1.958	2.643	2.517	2.306	2.355	2.731	2.329
27	2.648	2.811	2.742	2.734	2.667	2.692	2.529
28	2.87	2.630	2.494	2.723	2.644	2.526	2.815
29	2.314	2.520	2.336	2.438	2.398	2.465	2.495
30	2.674	2.731	2.688	2.789	2.680	2.670	2.694
31	2.557	2.687	2.569	2.855	2.771	2.634	3.029
32	2.082	2.609	2.437	2.570	2.557	2.661	2.661
33	3.161	2.864	2.841	2.844	2.847	2.897	2.860
34	3.236	2.956	3.006	2.987	3.056	2.897	3.235
35	2.928	2.911	2.844	2.701	2.724	2.926	2.827
36	3.435	3.209	3.226	2.899	3.014	3.125	3.026
37	3.256	2.765	3.094	2.560	2.704	2.890	3.246
38	2.585	2.566	2.570	2.274	2.459	2.583	3.123
39	3.034	2.659	2.845	2.375	2.520	2.421	3.021
40	2.304	2.560	2.580	2.691	2.629	2.400	2.317
41	2.413	2.394	2.140	2.406	2.417	2.261	2.372
42	2.286	2.529	2.546	2.430	2.486	2.328	2.572
43	2.313	2.567	2.554	2.823	2.753	2.480	2.531
44	2.537	2.433	2.143	2.538	2.545	2.460	2.538
45	2.482	2.611	2.605	2.484	2.584	2.568	2.737
46	2.927	2.787	3.039	2.955	2.940	2.771	2.745
47	2.769	2.685	2.602	2.670	2.705	2.769	2.704
48	2.856	2.906	3.045	2.539	2.751	2.854	2.903

RA-2 и RA-3 добијене су користећи *MRA* модел (другог и трећег реда), док су вредности добијене *ANN* методом означени су бројем који означава број неурона (5 и 10) и словом (R) *ReLU* или (T) *Tanh* активациону функцију 5x2 означава два скривена слоја и пет неурона.

Из табеле 11.13, може се приметити да је највећа храпавост ($3.435 \mu\text{m}$) добијена при параметрима обраде од $n = 5000 \text{ rev/min}$, $V_f = 1000 \text{ mm/min}$, и $a_p = 1 \text{ mm}$. Најбоља површинска храпавост ($1.958 \mu\text{m}$) добијена је при параметрима 5000 o/min , 400 mm/min и 0.6 mm . Сlike 11.32–11.35 приказују упоређене дијаграме измерених и предвиђених вредности *Ra* користећи *ANN* модел.

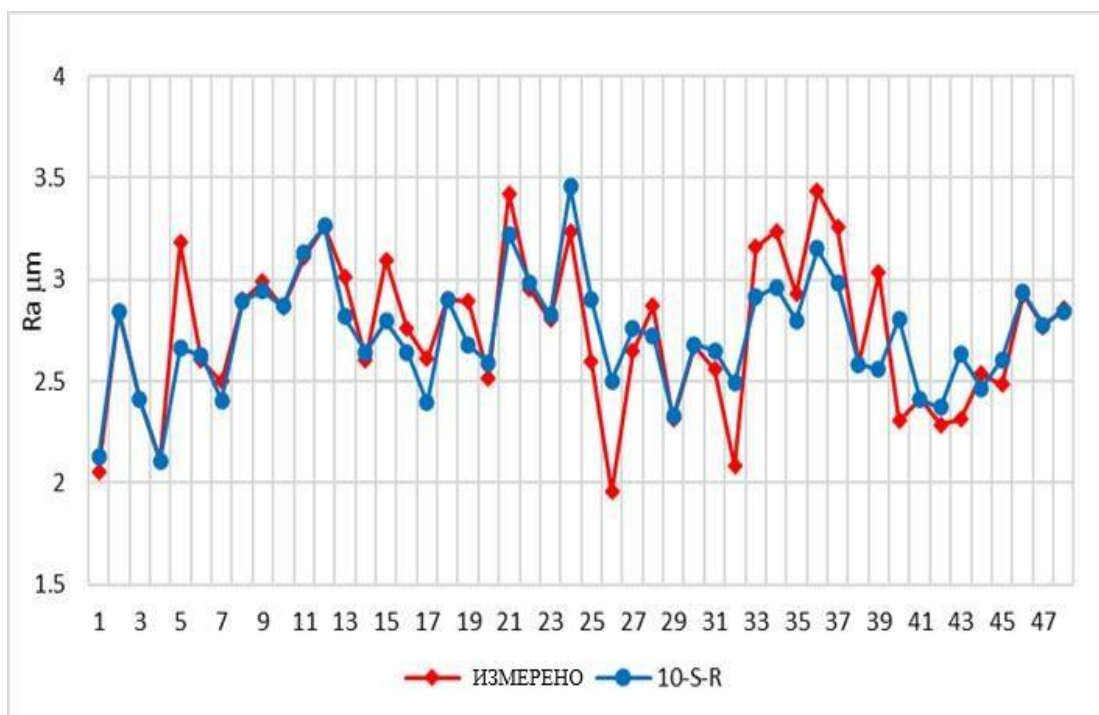
Са сlike 11.32 и табеле 11.13, може се видети да је 5-S-R модел је предвидео највећу храпавост у случају броја обртаја од 3000 o/min , брзине помоћног кретања од 1000 mm/min , и дубине резања од 1 mm . Најмања храпавост, односно најбољи квалитет обрађене површине добијен је предиктивним моделом са параметрима 3000 o/min , 400 mm/min и 0.3 mm .



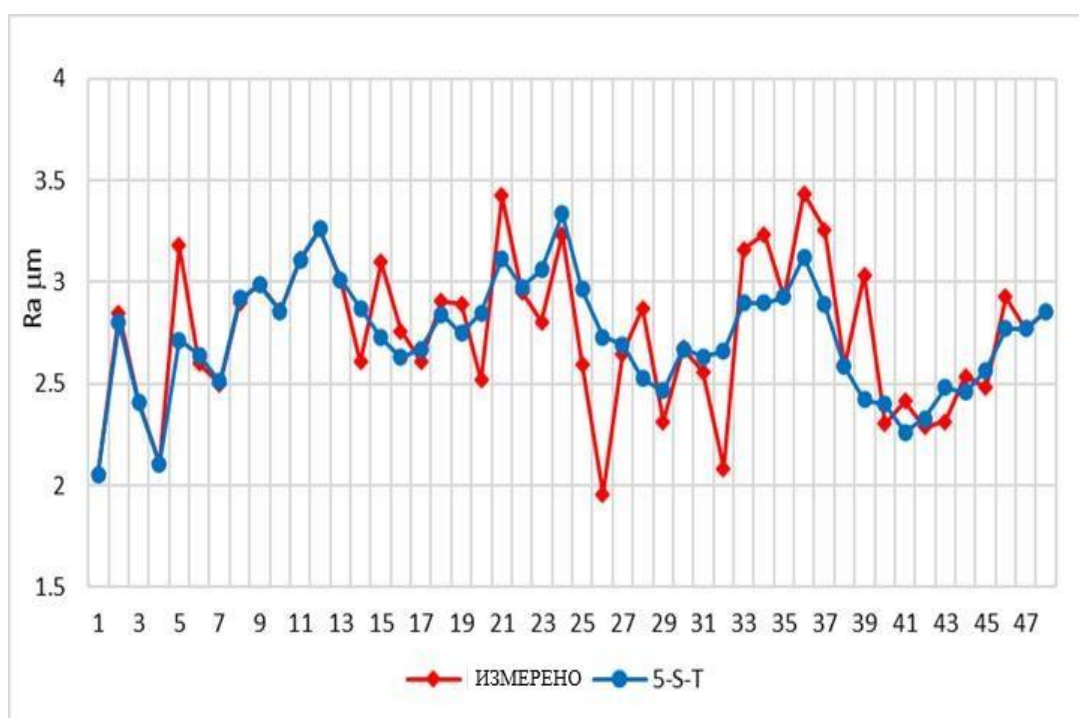
Слика 11.32 Поређење предвиђених и измерених резултата *Ra* са 5-S-R моделом.

Модел 10-S-R (сlike 11.33) предвидео је највећу храпавост ($3.277 \mu\text{m}$) у случају броја обртаја од 4000 o/min , брзине помоћног кретања 1000 mm/min , и дубине резања од 1 mm . Најмања храпавост ($2.318 \mu\text{m}$) добијена је предиктивним моделом са параметрима 3000 o/min , 400 mm/min и 0.3 mm .

5-S-T модел (сlike 11.34) предвидео је највећу храпавост ($3.336 \mu\text{m}$) у случају броја обртаја од 4000 o/min , брзине помоћног кретања од 1000 mm/min , и дубине резања 1 mm . Најмања храпавост ($2.056 \mu\text{m}$) добијена је предиктивним моделом са параметрима 3000 o/min , 400 mm/min и 0.3 mm .

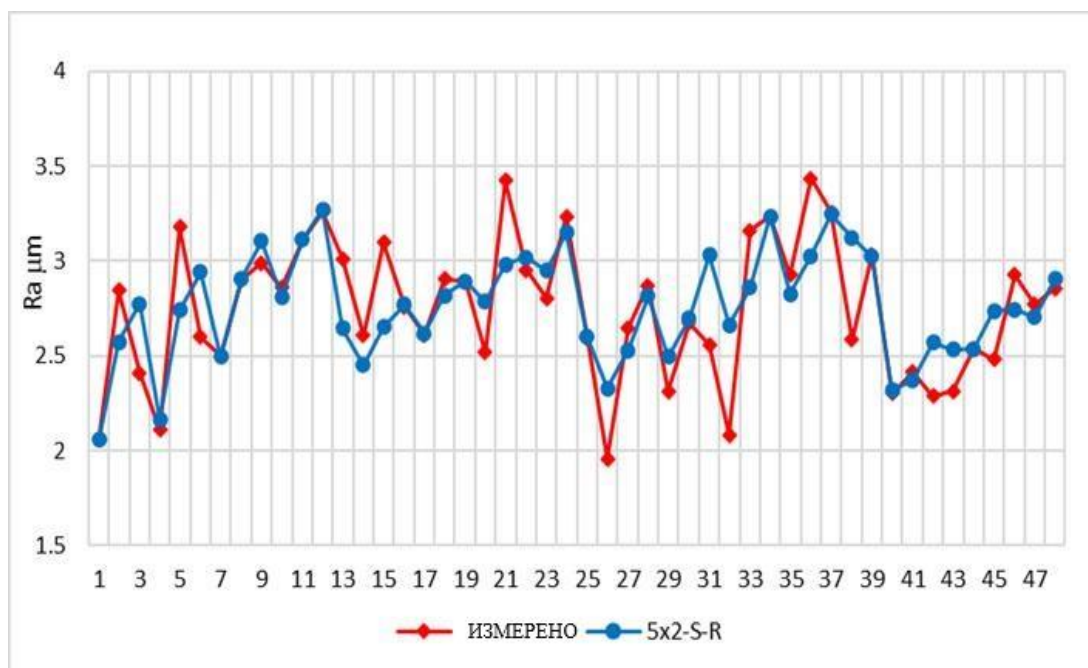


Слика 11.33 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 10-S-R моделом.



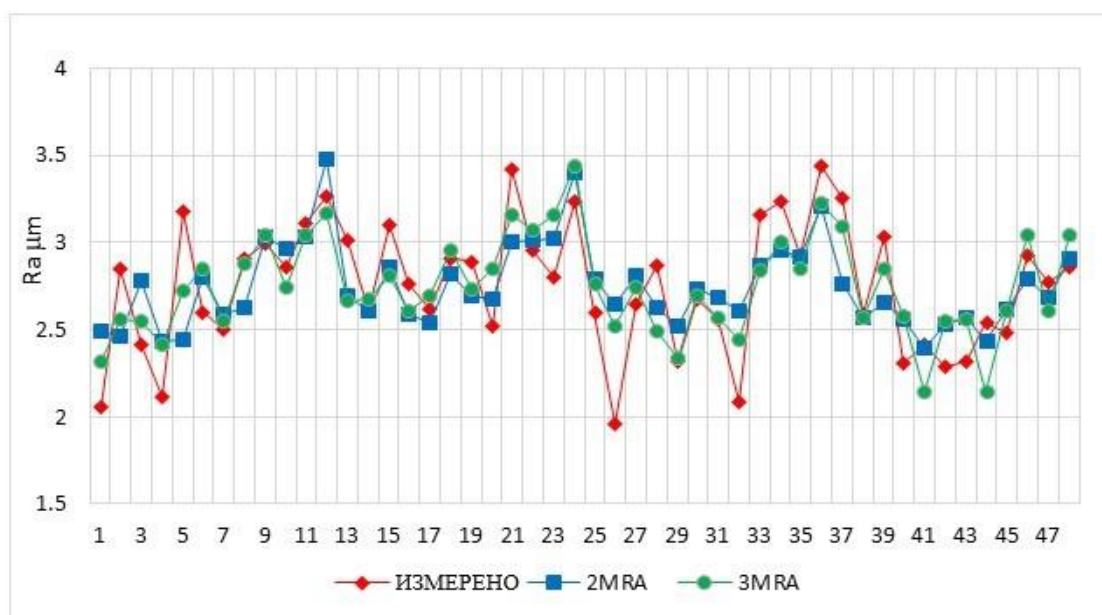
Слика 11.34 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 5-S-T моделом.

5x2-S-R модел (слика 11.35) предвидео је највећу храпавост ($3.272 \mu\text{m}$) у случају броја обраћа од 3000 o/min , брзине помоћног кретања 1000 mm/min , и дубине резања од 1 mm . Најмања храпавост ($2.056 \mu\text{m}$) добијена је предиктивним моделом са параметрима 3000 o/min , 400 mm/min и 0.3 mm .



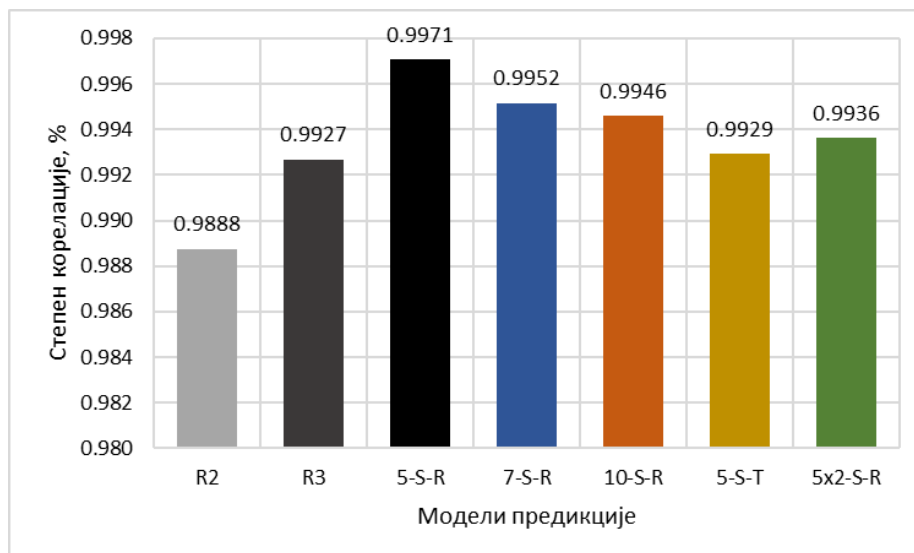
Слика 11.35 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 5x2-S-R моделом.

На слици 11.36 приказани су упоредни дијаграми измерених Ra вредности и предвиђене вредности за MRA моделе. RA-2 модел предвидео је највећу храпавост (3.478 μm) у случају када су параметри били број обртаја 3000 о/min, брзина помоћног кретања од 1000 mm/min и дубина резања 1 mm. Најнижа храпавост (2.394 μm), тј., најбољи квалитет обрађене површине, добијен је моделом који је користио параметре 6000 о/min, 600 mm/min и 0.6 mm. RA-3 имао је највећу храпавост (3.434 μm) у случају када су параметри били 4000 о/min, 1000 mm/min и 1 mm. Најнижа храпавост (2140 μm), тј., најбољи квалитет обрађене површине, добијен је кроз модел са параметрима 6000 о/min, 600 mm/min и 0.6 mm.



Слика 11.36 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra за RA-2 и RA-3 MRA моделе.

Највиши степен корелације остварен је кроз 5-S-R модел, а прате га 10-S-R, 5x2-S-R, и 5-S-T, док су модели RA-3 и RA-2 остварили најнижу корелацију. Слика 11.37 представља табеларни однос коефицијента детерминације R^2 за све предиктивне моделе.



Слика 11.37 Вредности тачности (R^2) ANN и MRA модела.

11.5 Побољшање димензионе и геометријске тачности и храпавости површине након обраде CNC глодањем

У овом експерименту извршено је штампање *FDM* поступком, са 3 различита материјала, елемената са основом и призматичним изданима. Изданци штампаних елемената су послужили као радни комади који су обрађивани CNC глодањем у циљу побољшања квалитета димензионалних и геометријских мера, као и храпавости површина.

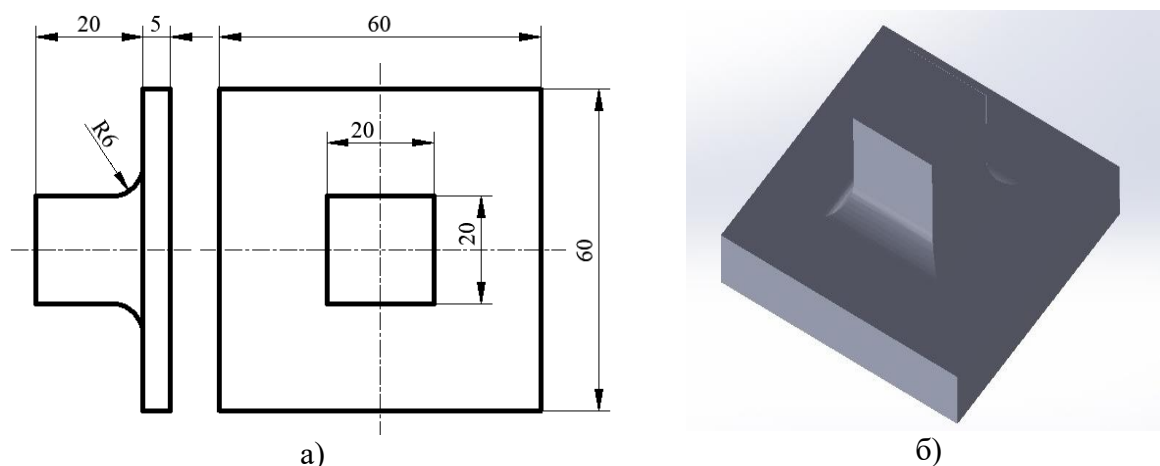
Након 3D штампе, делови су измерени на координатној мерној машини (*CMM*) и израчунате су димензионалне и геометријске мере – одступања. Изданци делова (радни комади) су затим обрађивани на CNC глодалици са изабраним параметрима обраде. Обрађене површине изданака су измерене на *CMM* и уређају за мерење храпавости и добијени нови извештаји мерења који су показали побољшање квалитета мера, облика и положаја изданака, као и побољшање квалитета храпавости површина.

Експеримент је искоришћен да се изведу најважнији закључци у циљу побољшања квалитета мера, облика и положаја, као и квалитета храпавости површина 3D штампаних делова.

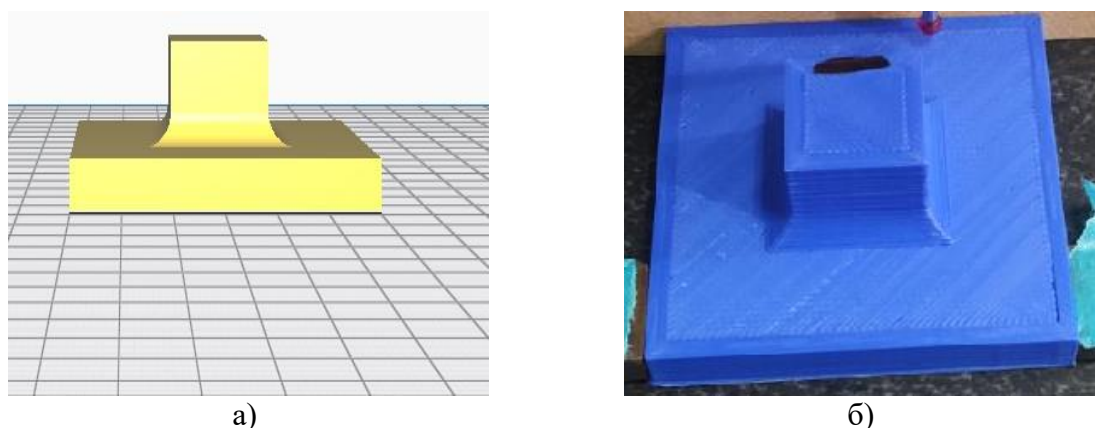
11.5.1 Материјали, методе и опрема

На основу задатих мера (слика 11.38-а), 3D CAD модел радног комада је моделован у *Solidworks 15x64 edition CAD* софтверу (слика 11.38-б). Фајл је сачуван као *STL* датотека и увезен у софтвер *Ultimaker Cura 4.11.0* (слика 11.39-а). Подешени су

параметри штампе и то густина испуне промењена на 100 %, док је оријентација градње била равна, затим је генерисан *G CODE* фајл. Штампано је 15 примерака радног комада, а коришћена су три различита материјала, *PLA*, *ABS* и *PETG*, од сваког материјала по пет комада. Радни комад је штампан помоћу *Creality CR10-s* штампача (слика 11.4), о коме је било речи у поглављу 11.1. Одштампани радни комад је приказан на слици 11.39-б.



Слика 11.38 Мере радног комада (а) и *CAD* модел радног комада (б)



Слика 11.39 *STL* модел (а) и одштампан радни комад (б)

Мерења димензионе тачности вршена су на координатној мерној машини (*CMM*) *Tessa Micro Hite 4-5-4* (Слика 11-5) чије су карактеристике наведене у поглављу 11.1.

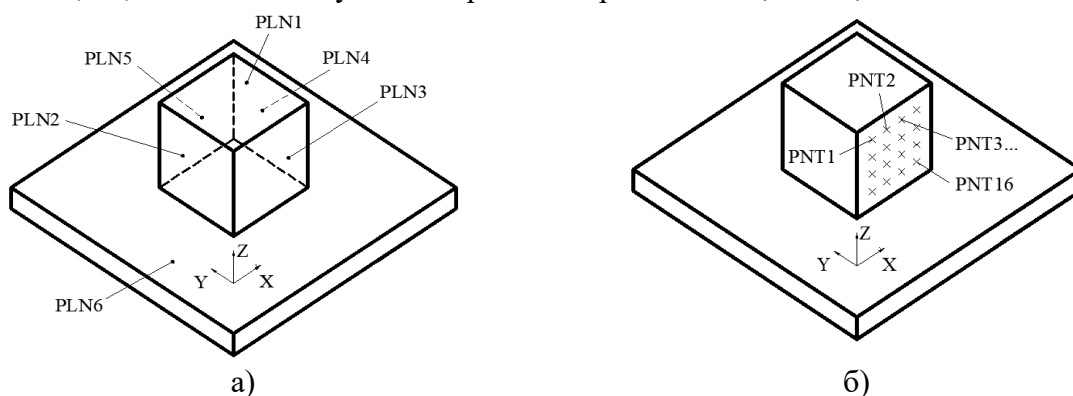
11.5.1.1 План мерења на координатној мерној машини након штампе

Инспекција изданака одштампаних делова је извршена у софтверу *TESA-REFLEX recorder application software*, лиценсираном софтверу произвођача мерне машине. План мерења је представљен на слици 11.39. Мерене равни су *PLN1*, *PLN2*, *PLN3*, *PLN4*, *PLN5* и *PLN6* (слика 11.40-а). Равни су апроксимиране површином, софтверски израчунатом, методом најмањих квадрата на бази мерне матрице 4x4 мерних тачака по свакој површини (слика 11.40-б). Мерене тачке су на једнаком међусобном растојању, обележене редом са *PNT1*, *PNT2*, *PNT3*... до *PNT16*. Резултати мерења представљају координате наведених тачака.

Површине од интереса су површине PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5. Раван PLN6 је послужила као референтна раван у случају мерења управности, док су равни PLN4 и PLN5 послужиле као референтне равни за мерење одступања од паралелности равни PLN2 и равни PLN4.

Мерена су следећа одступања растојања и одступања од облика и положаја:

- X - растојање тежишних тачака између апроксимативних равни PLN2 и равни PLN4,
- Y - растојање тежишних тачака између апроксимативних равни PLN3 и равни PLN5,
- I_1, I_2, I_3, I_4 – одступања од управности равни PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5 у односу на референтну раван PLN6,
- //1 и //2 – одступања од паралелности равни PLN2 у односу на референтну раван PLN4 и одступања од паралелности равни PLN3 у односу на референтну раван PLN5 и
- -1, -2, -3 и -4 – одступања од равности равни PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5.



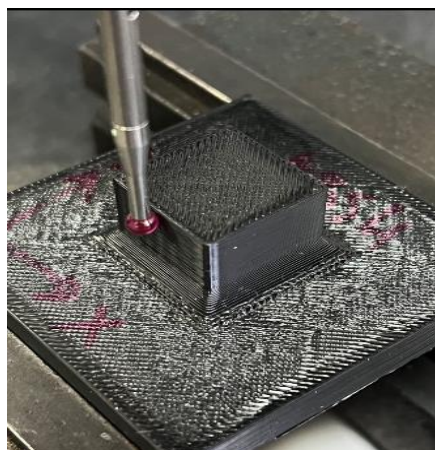
Слика 11.40 План мерења по мерној равни и тачкама мерених површина

План мерења у софтверу мерне машине *TESA-REFLEX recorder application software* приказана је на слици 11.41 Приказане су равни и толеранције облика и положаја (слика 11.41-а) као и поступак мерења појединачних тачака (слика 11.41-б).

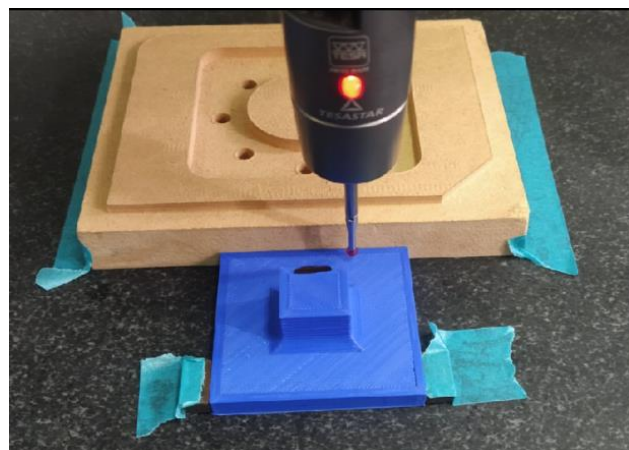


Слика 11.41 План мерења по мерној равни у софтверу мерне машине *TESA-REFLEX recorder application software* (а) и план мерења тачака мерених површина (б)

На слици 11.42 приказан је поступак мерења изданака од *ABS* материјала (слика 11.42-а) и *PLA* материјала (слика 11.42-б).



а)



б)

Слика 11.42 Поступак мерења површина изданака *ABS* (а) и *PLA* материјала (б)

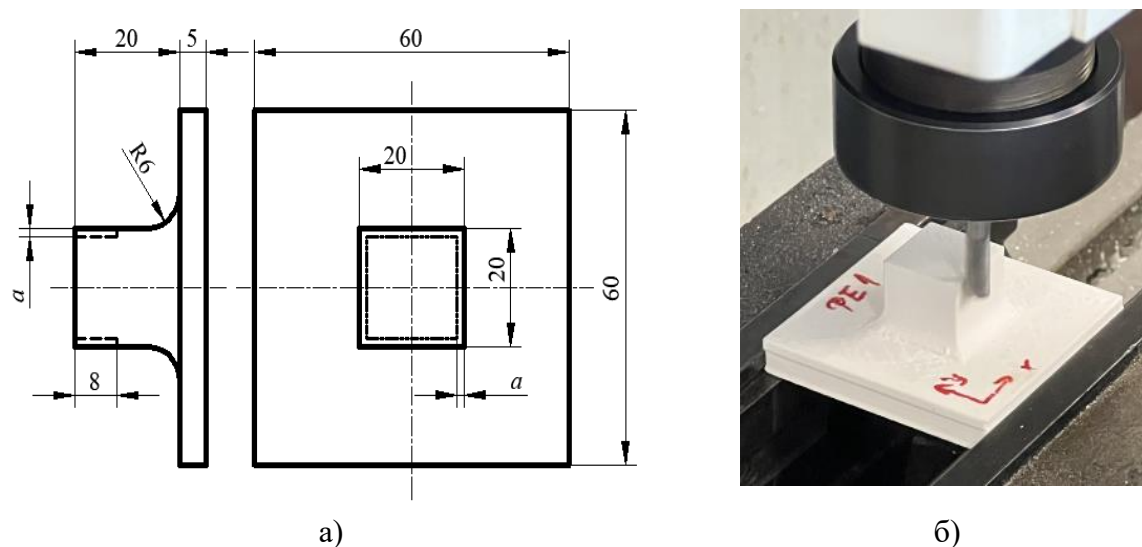
Машина коришћена за машинску обраду била је вертикална глодалица *Haas VF-3SS* са три *CNC*- управљане осе (слика 11.29), чије су карактеристике дате у поглављу 11.5. Параметри обраде дати су у табели 11.14. Број обртаја, брзина помоћног кретања и ширина резања за све радне комаде била је непромењена, док је дубина резања (*a*) варирана од 0.1 до 0.4 mm за прва 4 радна комада (изданака), док је пети радни комад остао необрађен.

Глодало које је коришћено у експерименту је вретенасто глодало пречника 6 mm тврдог метала дато на слици 11.31, а детаљно описано у поглављу 11.4.

Табела 11.14 Параметри обраде глодањем

Изданак	1	2	3	4
Број обртаја, o/min	6000			
Брзина помоћног кретања, mm/min	400			
Ширина резања, mm	8			
Дубина резања, mm	0,1	0,2	0,3	0,4

Обрада изданака је вршена према плану приказаном на слици 11.43-а и табели 11.14. Обрада је вршена према унапред одређеном *NC* коду. Након што су радни комади одштампани извршено је мерење дужина у *X* и *Y* правцу, сваког изданка посебно. *NC* код је написан тако што је на свако измерено растојање (*X* и *Y*) извршен офсет путање унутар површине изданка радног комада. Тако да је на изданку број 1 путања алата офсетована (померена) за дубину резања 0.1 mm, на изданку 2 за 0.2 mm, на изданку 3 за 0.3 mm до 4-ог изданка са 0.4 mm офсета.

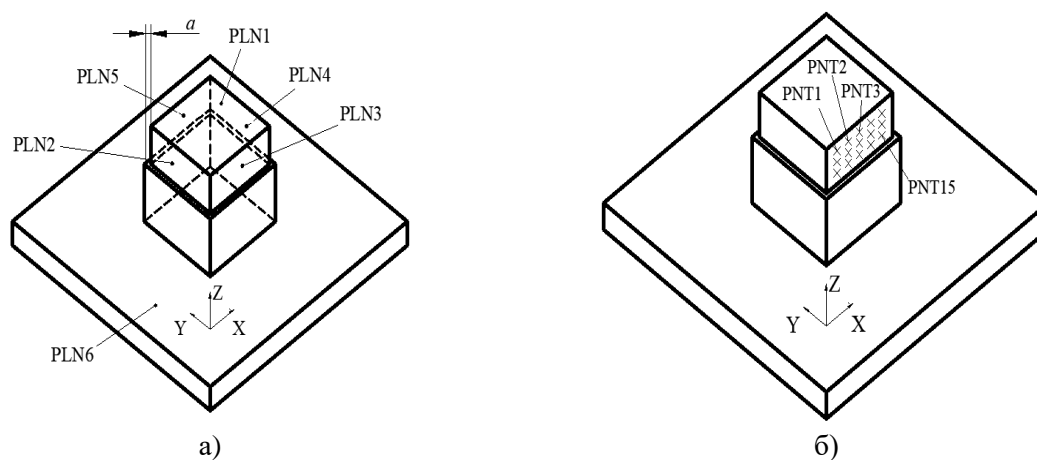


Слика 11.43 План резања и поступак резања изданака

11.5.1.2 План мерења на координатној мерној машини након штампе

Инспекција резаних делова изданака извршена у софтверу *TESA-REFLEX recorder application software*, лиценсираном софтверу произвођача мерне машине. План мерења је представљен на слици 11.40. Мерене равни су PLN1, PLN2, PLN3, PLN4, PLN5 и PLN6 (Слика 11.44-а). Равни су апроксимирани површином, софтверски израчунатом, методом најмањих квадрата на бази мерне матрице 3x5 мерних тачака по свакој површини (Слика 11.44-б). Мерене тачке су на једнаком међусобном растојању, обележене редом са PNT1, PNT2, PNT3... до PNT15. Резултати мерења представљају координате наведених тачака.

Површине од интереса су површине PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5. Раван PLN6 је послужила као референтна раван у случају мерења управности, док су равни PLN4 и PLN5 послужиле као референтне равни за мерење одступања од паралелности равни PLN2 и равни PLN4.



Слика 11.44 План мерења по мерној равни (а) и тачкама мерених површина након резања (б)

Мерена су одступања растојања и одступања од облика и положаја равни од интереса као у случају мерења пре резања – након штампе, што је детаљно описано раније у овом поглављу.

11.5.2 Резултати и дискусија

У табели 11.15 приказани су резултати измерених величина одступања након штампања делова. Приказана су одступања од дужина (X и Y) и резултати одступања од облика и положаја и то: I1, I2, I3, I4 – одступања од управности равни PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5 у односу на референтну раван PLN6, //1 и //2 – одступања од паралелности равни PLN2 у односу на референтну раван PLN4 и одступања од паралелности равни PLN3 у односу на референтну раван PLN5 као и -1, -2, -3 и -4 – одступања од равности равни PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5.

Табела 11.15 Вредности одступања дужина и одступања од облика и положаја након 3D штампе

	ABS					PETG					PLA				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
X	19.900	19.953	19.983	19.948	19.959	20.004	19.883	20.022	20.032	20.047	19.867	19.905	19.868	19.841	19.858
Y	19.895	19.959	19.978	19.962	19.958	19.978	19.899	20.008	20.008	20.021	19.881	19.929	19.872	19.826	19.857
I1	0.093	0.173	0.115	0.044	0.084	0.097	0.034	0.094	0.060	0.028	0.104	0.051	0.111	0.086	0.098
I2	0.109	0.153	0.118	0.064	0.063	0.077	0.051	0.045	0.100	0.021	0.067	0.095	0.134	0.061	0.067
I3	0.129	0.177	0.142	0.061	0.056	0.031	0.069	0.070	0.026	0.076	0.049	0.078	0.089	0.083	0.100
I4	0.101	0.158	0.146	0.050	0.056	0.025	0.063	0.065	0.030	0.079	0.100	0.042	0.081	0.076	0.127
//1	0.129	0.173	0.194	0.073	0.037	0.103	0.085	0.068	0.047	0.108	0.166	0.077	0.169	0.151	0.206
//2	0.096	0.174	0.154	0.056	0.085	0.098	0.055	0.054	0.077	0.092	0.120	0.108	0.170	0.139	0.157
-1	0.088	0.160	0.085	0.023	0.055	0.046	0.027	0.073	0.033	0.022	0.068	0.034	0.091	0.063	0.090
-2	0.090	0.085	0.100	0.053	0.056	0.017	0.045	0.037	0.067	0.018	0.062	0.081	0.090	0.045	0.059
-3	0.074	0.141	0.126	0.055	0.034	0.017	0.058	0.042	0.021	0.033	0.041	0.041	0.073	0.057	0.082
-4	0.082	0.153	0.141	0.043	0.055	0.019	0.040	0.032	0.026	0.035	0.058	0.039	0.077	0.064	0.111

У табели 11.16 приказани су резултати измерених величина одступања након резања према раније наведеним параметрима обраде.

Табела 11.16 Вредности одступања дужина и одступања од облика и положаја након резања

	ABS				PETG				ABS			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
X	19.695	19.501	19.478	19.309	19.707	19.558	19.400	19.299	19.651	19.500	19.274	19.061
Y	19.670	19.493	19.425	19.248	19.689	19.556	19.388	19.218	19.670	19.539	19.273	19.051
I1	0.007	0.106	0.158	0.141	0.060	0.017	0.018	0.323	0.068	0.030	0.021	0.064
I2	0.004	0.061	0.112	0.119	0.007	0.011	0.061	0.242	0.008	0.075	0.034	0.017
I3	0.017	0.045	0.037	0.078	0.008	0.015	0.023	0.019	0.004	0.032	0.032	0.028
I4	0.009	0.004	0.142	0.111	0.008	0.008	0.021	0.097	0.010	0.180	0.019	0.052
//1	0.011	0.109	0.146	0.200	0.065	0.016	0.018	0.321	0.093	0.027	0.044	0.050
//2	0.008	0.022	0.185	0.208	0.010	0.007	0.019	0.280	0.009	0.171	0.013	0.056
-1	0.005	0.093	0.086	0.068	0.044	0.013	0.013	0.159	0.056	0.021	0.024	0.046
-2	0.004	0.051	0.093	0.062	0.004	0.009	0.049	0.163	0.007	0.065	0.019	0.012
-3	0.008	0.033	0.033	0.044	0.003	0.009	0.017	0.015	0.003	0.016	0.013	0.027
-4	0.004	0.002	0.091	0.056	0.007	0.006	0.012	0.062	0.004	0.141	0.007	0.051

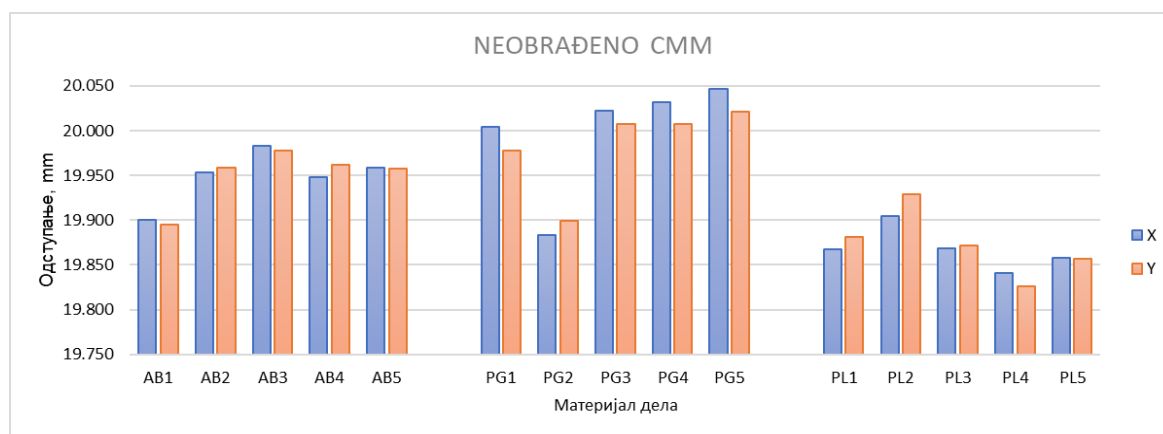
Приказана су одступања од дужина (X и Y) и резултати одступања од облика и положаја и то: 11, 12, 13, 14 – одступања од управности равни PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5 у односу на референтну раван PLN6, //1 и //2 – одступања од паралелности равни PLN2 у односу на референтну раван PLN4 и одступања од паралелности равни PLN3 у односу на референтну раван PLN5 као и -1, -2, -3 и -4 – одступања од равности равни PLN2, PLN3, PLN4 и PLN5.

11.5.3 Поређење одступања штампаних радних комада пре обраде и након обраде

Са слике 11.45, на којој су приказана поређења одступања дужина страница X и Y узорака штампаних делова, примећује се да у случају узорака од *ABS* материјала (*ABS1* - *ABS5*) одступања дужина страница X и Y код необрађених узорака варирају, али остају у оквиру релативно уског распона. Ово може указивати на уједначеност димензионалне стабилности код узорака од *ABS* материјала, упркос мањим одступањима.

Када је реч о узорцима од *PETG* материјала (*PETG1* - *PETG5*), они показују већа одступања у поређењу са узорцима од *ABS*-а, посебно у X правцу. Ова одступања могу бити резултат напрезања у материјалу током *3D* штампе нпр. услед неравномерног хлађења, што може узроковати мање тачности у димензијама.

Код узорака од *PLA* материјала (*PLA1* - *PLA5*) такође има одступања, али су она углавном мања у поређењу са узорцима од *PETG* материјалима. Узорци од *PLA* материјали су показали већу стабилност у Y правцу, док X правац бележи већа одступања.



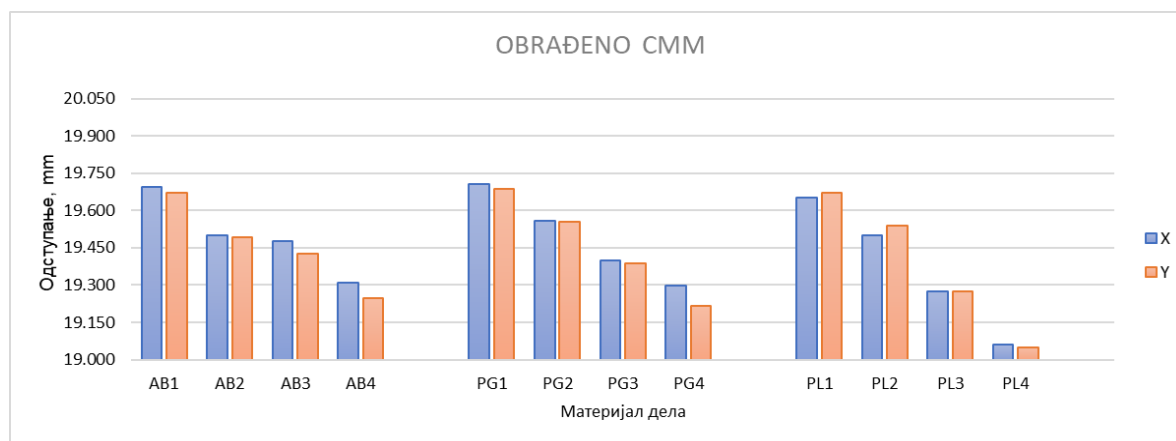
Слика 11.45 Поређења одступања дужина страница X и Y код штампаних узорака

Са слике 11.46 на којој су приказана поређења одступања дужина страница X и Y изданака обрађених делова, може се приметити да је у случају *ABS* материјала (*ABS1* - *ABS4*), Након обраде, приметна је редуција одступања у дужинама страница X и Y код *ABS*, што указује на побољшање димензионалне тачности обрадом. То сугерише да накнадна обрада има утицаја на стабилизацију димензија код *ABS* материјала.

За узорке направљене од *PETG* материјала (*PETG1* - *PETG4*) бележи се смањење одступања након обраде, али у мањој мери него код *ABS*-а. И даље постоје приметна

одступања у X правцу, што може указивати на потешкоће у стабилизацији овог материјала обрадом.

У случају PLA материјала ($PLA1 - PLA4$) они након обраде показују знатно мања одступања у односу на необрађене узорке, што сугерише да је обрада ефективна за стабилизацију овог материјала, посебно у X правцу.



Слика 11.46 Поређења одступања дужина страница X и Y изданака обрађених делова

На слици 11.47, приказана су одступања од управности штампаних и обрађених узорка од различитих материјала (ABS , $PETG$, и PLA). Овде је анализирано више типова одступања управности, која су означена са 11, 12, 13, и 14, а вредности су изражене у микрометрима (μm).

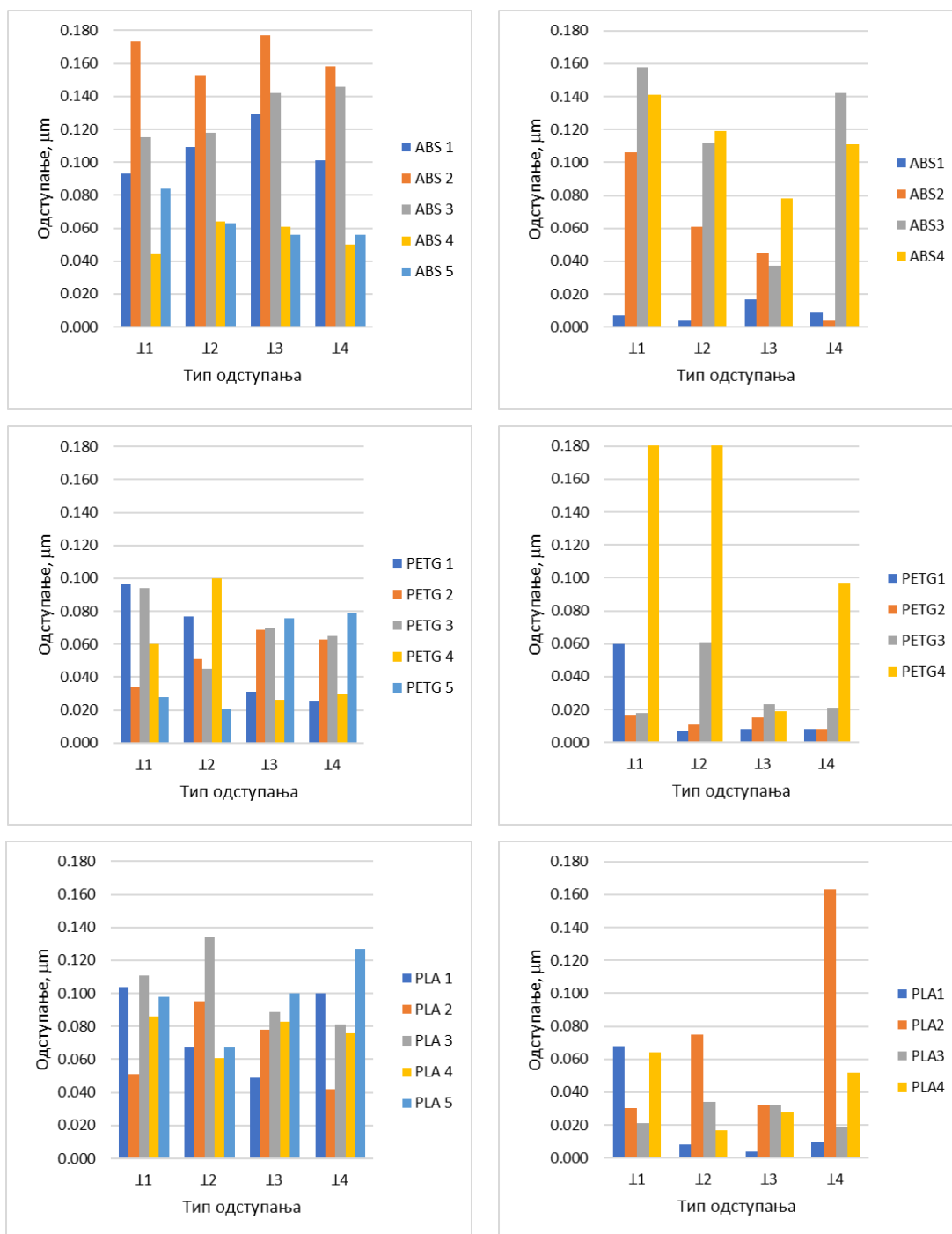
У случају узорка направљених од ABS материјала, уочава се значајно одступање у вредностима за различите типове одступања пре обраде. Тип одступања 13 показује највеће одступање за већину узорка (посебно код $ABS 2$ узорка). Након обраде, видљиво је смањење вредности одступања за скоро све узорке. Највеће смањење је код типа одступања 13, што указује на ефикасност обраде у смањењу неправилности.

У случају узорка направљених од $PETG$ материјала, тип одступања 12 има највише вредности за већину узорка пре обраде, док остали типови одступања варирају. Након обраде долази до значајног смањења вредности за све типове одступања осим $PETG 4$ узорка. Иако 12 и даље показује веће вредности, укупно смањење одступања је присутно, посебно код $PETG 3$ и $PETG 4$ узорка.

За случај узорка од PLA материјала, пре обраде, видљива су релативно конзистентна одступања, али 12 и 14 имају веће вредности за одређене узорке, посебно за $PLA 2$ и $PLA 3$. Након обраде, скоро сви типови одступања показују смањење вредности, осим узорка $PLA 2$ за тип одступања 14. $PLA 3$ и $PLA 4$ имају најмање одступање након обраде.

На слици 11.48 приказана су поређења одступања од паралелности штампаних и обрађених узорка направљених од ABS материјала, Узорци $ABS 1$ до $ABS 5$ показују различите вредности одступања за типове одступања //1 и //2. Примећује се да узорак

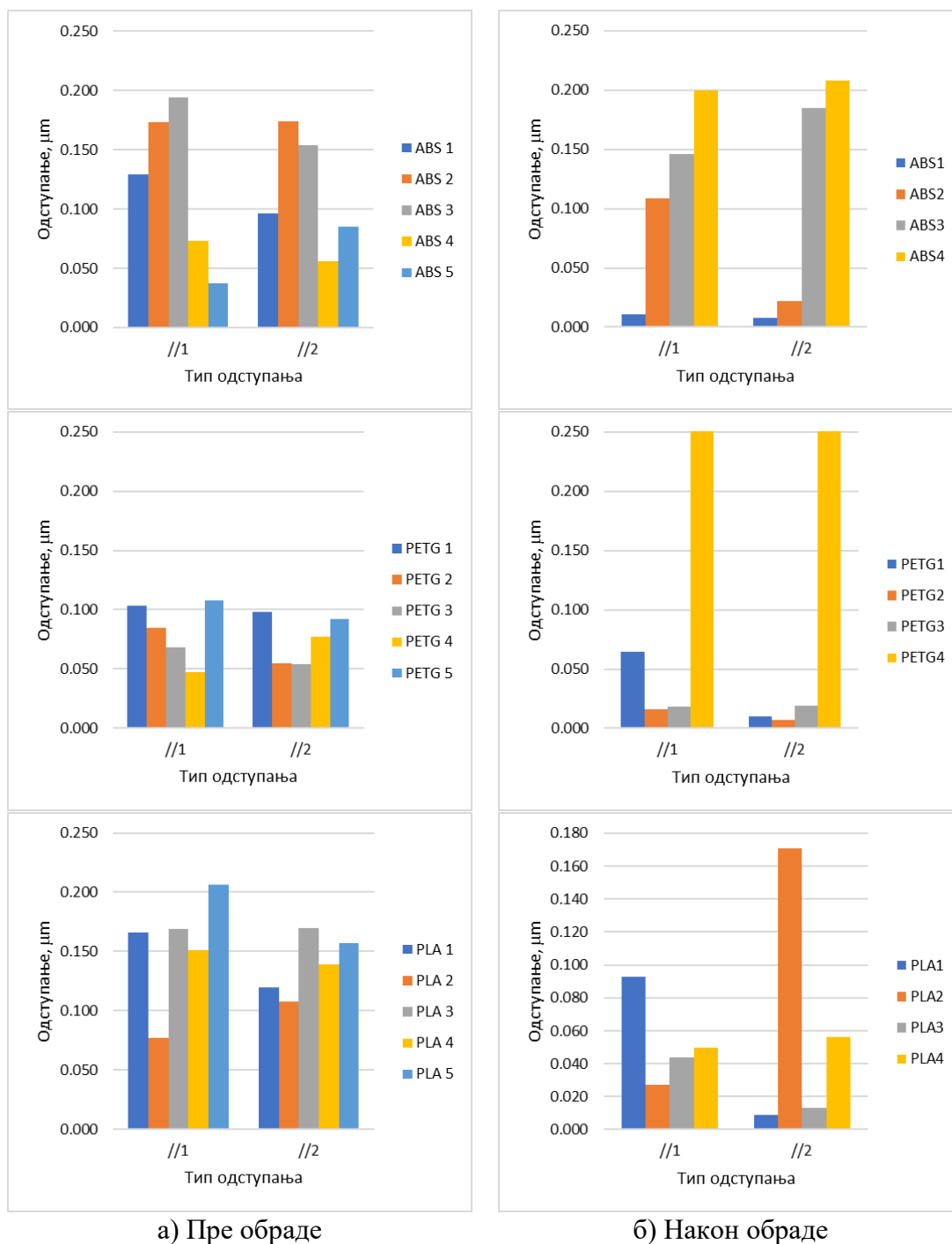
ABS 3 има највеће одступање пре обраде, док је код осталих узорака одступање ниже, а након обраде је највеће одступање видљиво код ABS 4 узорка. Генерално, пре обраде постоје варијације између узорака, с тим да ABS 3 показује највеће одступање. После обраде, примећено је значајно смањење одступања, посебно код ABS 1 узорка који је имао доста веће вредности пре обраде.



а) Пре обраде

б) Након обраде

Слика 11.47 Поређења одступања од управности штампаних и обрађених делова

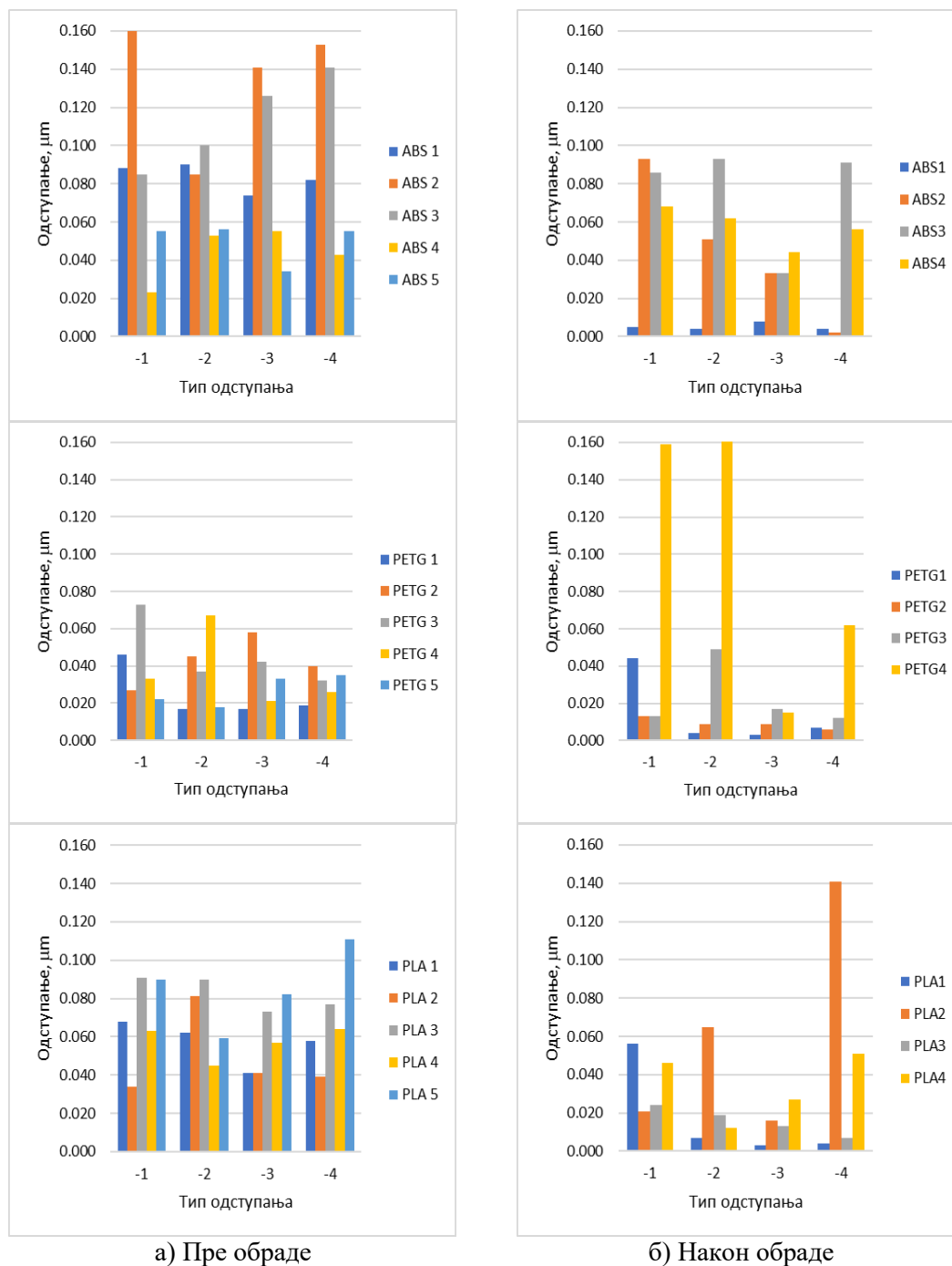


Слика 11.48 Поређења одступања од паралелности штампаних делова и обрађених делова

У случају *PETG* узорака, видљива су одступања која су релативно уједначена за оба типа одступања. Највећа одступања су примећена код *PETG 5*, док остали узорци показују мање варијације. *PETG* материјали имају мања одступања у поређењу са *ABS* материјалима пре обраде. *PETG* узорци такође показују смањење одступања после обраде, са највећим смањењем код *PETG 2*. Обрада је ефикасно смањила одступања, чиме је побољшана паралелност код већине *PETG* узорака осим код *PETG 4*, где је дошло до повећања.

PLA узорци имају конзистентна одступања за оба типа, са малим разликама међу узорцима. *PLA* материјал је показао највеће одступање од паралелности пре обраде у поређењу са *ABS* и *PETG* материјалима (Тип одступања //2 за узорак *PLA* 5). Након обраде, паралеленост је смањена за скоро све узорке.

Са слике 11.49 могу се видети поређења одступања од равности штампаних делова и обрађених делова. За случај узорака од *ABS* материјала,



Слика 11.49 Поређења одступања од равности штампаних делова и обрађених делова

Постоје значајна одступања од управности код различитих узорака (*ABS 1* до *ABS 5*) пре обраде. На типовима одступања (-1 , -2 , -3 , и -4), одступања су релативно уједначена између узорака, али примећује се да узорци *ABS 2* и *ABS 3* имају веће одступање у одређеним случајевима. После обраде, видимо значајно смањење одступања од управности код свих узорака (*ABS 1* до *ABS 4*). Обрада је успешно смањила одступања, посебно код узорака који су раније имали веће вредности (посебно *ABS 2*).

PETG узорци такође показују одступања, где је примећено да *PETG 3* има највећу вредност одступања у поређењу са другим узорцима. *PETG* материјали показују варијације међу узорцима, али су одступања нижа у поређењу са *ABS* материјалима. *PETG* узорци показују значајно смањење одступања после обраде, нарочито код *PETG 1* и *PETG 3*. На основу ових резултата, види се да је обрада била ефикасна у смањењу одступања за све *PETG* узорке, изузев *PETG 4* узорка, где је досло до повећања.

Код *PLA* узорака (*PLA 1* до *PLA 5*), примећена су умерена одступања. *PLA* материјал показује стабилнија одступања од управности између узорака у поређењу са *ABS* и *PETG* материјалима. Код *PLA* узорака, смањење одступања је уочљиво, али није толико изражено као код *ABS* и *PETG* узорака. Ипак, обрада је успела да смањи одступања код свих *PLA* узорака, са минималним заостатком у одступањима код *PLA 4*.

11.5.4 Поређење измерених храпавости површина штампаних радних комада од *PLA* материјала пре обраде и након обраде

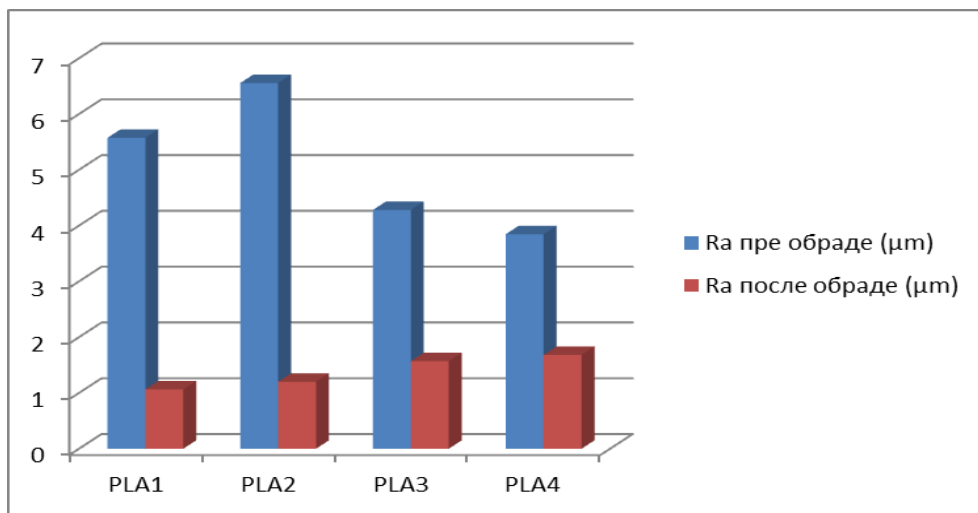
Узорци за мерење храпавости површине штампани су на *нискобуџетном Creality CR 10-s* штампачу (слика 11.4), чије су карактеристике приказане у поглављу 11.1. Сви узорци обрађени су на *CNC* глодалици *Haas VF-3SS* (слика 11.29), о којој је више речи било у поглављу 11.4. Материјал који је коришћен је *PLA*. Обрада је вршена вретенастим глодалом (слика 11.30, поглавље 11.4), док је храпавост површине пре и после обраде мерена на *TALYSURF-6* мерном систему повезаним са рачунаром који је приказан на слици 11.26, које је такође описано у поглављу 11.3.

Број обртаја, брзина помоћног кретања и ширина резања за све радне комаде била је непромењена, док је дубина резања (a) варирана од 0.1 до 0.4 mm за прва 4 радна комада (изданака), док је пети радни комад остао необрађен. У табели 11.17 Приказане су вредности површинске храпавости пре и након обраде.

Табела 11.17 Површинска храпавост пре и након обраде

Узорак	<i>PLA1</i>	<i>PLA2</i>	<i>PLA3</i>	<i>PLA4</i>
<i>Ra</i> пре обраде (μm)	5.574	6.556	4.282	3.846
<i>Ra</i> после обраде (μm)	1.064	1.201	1.569	1.681

Са слике 11.50, може се приметити да се обрадом глодањем може значајно смањити површинска храпавост $3D$ штампаних делова. Поред тога, може се уочити да параметри обраде, могу имати велики утицај на површинску храпавост, јер се у овом случају, са повећањем дубине резања, повећавала и површинска храпавост.



Слика 11.50 Површинска храпавост пре и након обраде

11.6 Одређивање димензионалне и геометријске тачности помоћу $3D$ скенера

У овом експерименту, применом $3D$ скенера, приказано је одређивање димензионалне и геометријске тачности узорка добијених помоћу $3D$ штампе и затим обрађених на CNC глодалици (узорци из претходног експеримента - поглавље 11.5). Извршена је инспекција и добијени су извештаји мерења. Приказана су димензионална одступања као и одступања од геометријских мера.

11.6.1 Материјали, методе и опрема

Мерења димензионе тачности вршена су високопрецизним $3D$ скенером *ATOS II* (слика 11.51). *ATOS II* је високопрецизни $3D$ скенер, познат по могућности детаљног снимања површина, што га чини идеалним за индустријске примене попут контроле квалитета, инспекције и реверзибилног инжењеринга. Неки од главних карактеристика *ATOS II* скенера укључују употребу технологије плавог светла, што омогућава тачна мерења независно од амбијенталних светлосних услова.

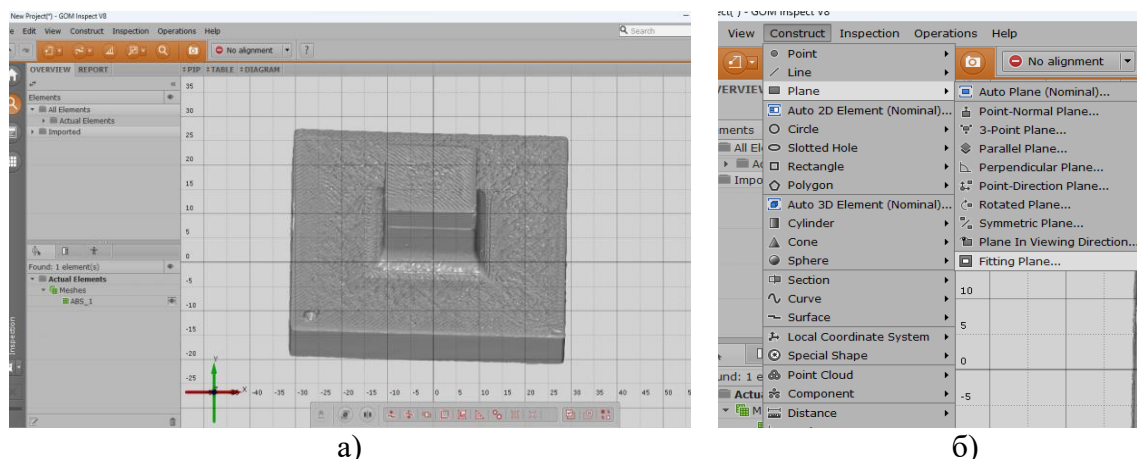
Захваљујући *Triple Scann* технологији, користи стерео камере за поуздано прикупљање података, што омогућава квалитетно скенирање и рефлектујућих или сложених површина. *ATOS II* долази с различитим замењивим мерним пољима, која обухватају величине до 700 mm x 530 mm, чинећи га прилагодљивим за различите димензије објеката. Промена величине мерних поља не захтева рекалибрацију, што доприноси ефикасности рада. Такође је компатибилан са *GOM* софтверским алатима, укључујући *GOM Inspect*, који омогућава додатне опције анализе, параметарску инспекцију, увоз *CAD* модела и аутоматско генерисање извештаја.



Слика 11.51 ATOS II 3D скенер [286]

11.6.2 План мерења

Резултати 3D скенирања, облаци тачака (слика 11.52-а), за сваки обрађени део, увезени су у софтвер *GOM Inspect V8* у коме је извршена инспекција одступања. Након увоза облака тачака обрађене површине су апроксимирани површинама (слика 11.52-б) Гаусовом методом најмањих квадрата.

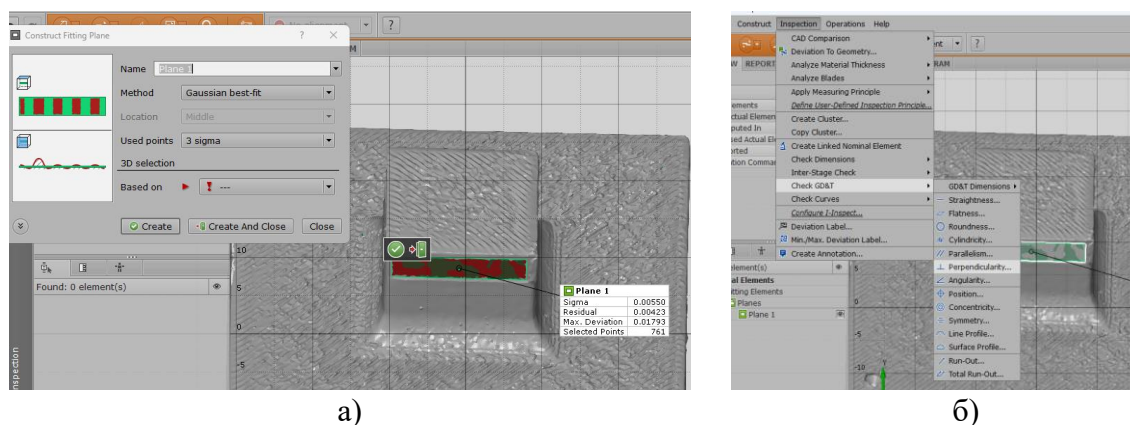


а)

б)

Слика 11.52 Облак тачака скенираног дела и поступак избора апроксимације површине

Свака обрађена површина је апроксимирана (слика 11.53-а), а затим су одређена, најпре димензионална одступања по X и Y правцу, а затим и сва геометријска одступања, управности, паралелности и равности (слика 11.53-б).

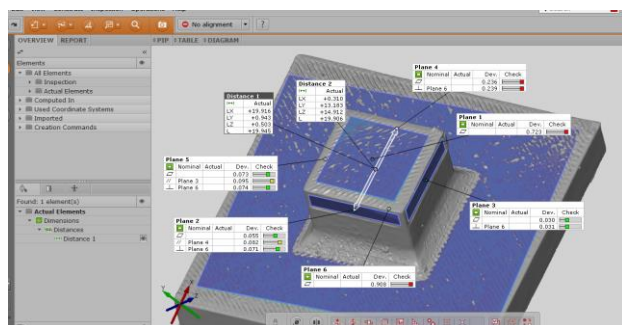


а)

б)

Слика 11.53 Апроксимација скенираних површина и избор толеранција облика и положаја

Софтверски су добијена сва жељена одступања (слика 11.54-а) и извештај мерења у PDF формату (слика 11.54-б).



а)

Generated with GOM Inspect V8 gom

ABS 1

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Plane 6		∠	+0.000	+0.908	+0.000	+0.100	+0.908	■	+0.808
Plane 5	Plane 6	⊥	+0.000	+0.074	+0.000	+0.100	+0.074	■	
Plane 5	Plane 3	//	+0.000	+0.095	+0.000	+0.100	+0.095	■	
Plane 5	Plane 3	∠	+0.000	+0.073	+0.000	+0.100	+0.073	■	
Plane 4	Plane 6	∠	+0.000	+0.239	+0.000	+0.100	+0.239	■	+0.139
Plane 4	Plane 6	∠	+0.000	+0.236	+0.000	+0.100	+0.236	■	+0.136
Plane 3	Plane 6	⊥	+0.000	+0.031	+0.000	+0.100	+0.031	■	
Plane 3	Plane 3	∠	+0.000	+0.030	+0.000	+0.100	+0.030	■	
Plane 2	Plane 6	⊥	+0.000	+0.071	+0.000	+0.100	+0.071	■	
Plane 2	Plane 4	//	+0.000	+0.082	+0.000	+0.100	+0.082	■	
Plane 2	Plane 2	∠	+0.000	+0.055	+0.000	+0.100	+0.055	■	

б)

Слика 11.54 Добијена одступања и извештај мерења добијен у GOM Inspect V8 софтверу

11.6.3 Резултати мерења

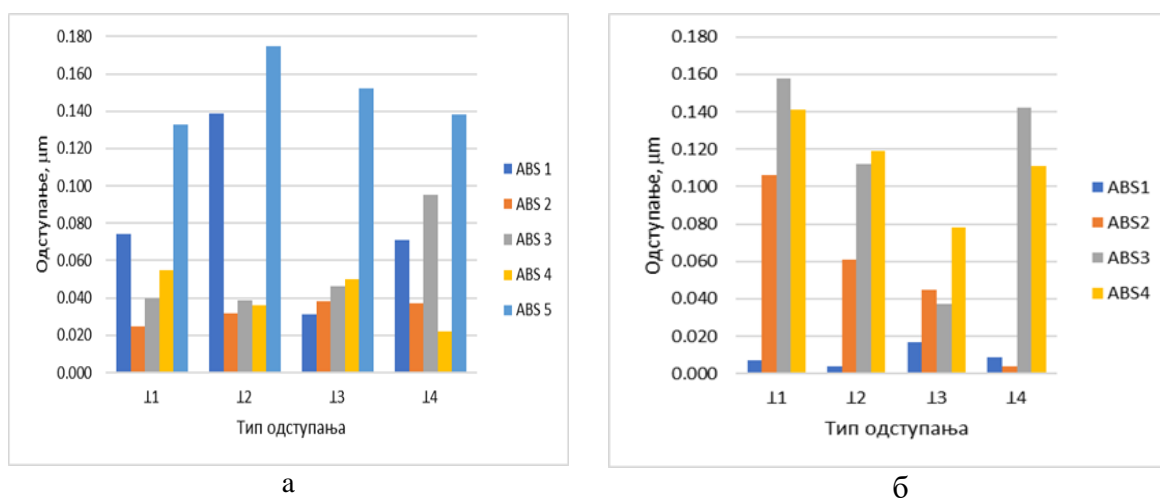
У табели 11.18 приказани су резултати одступања дужина и одступања облика и положаја узорака од ABS-а, PETG-а и PLA материјала након обраде. За сваки материјал су приказане вредности одступања у X и Y координатама. Са аспекта дужина, X и Y координате за све узорке показују релативно уске опсеге вредности, што указује на доследно позиционирање сваког материјала након обраде. Код ABS-а су вредности X координате највише варијабилне (од 19.34 до 20.16), док PETG и PLA имају уже опсеге, што указује на стабилнију обраду или мерење. Највеће одступање забележено је код ABS-а (0.433), док је најмање одступање код свих материјала 0.013 код PLA. Ово сугерише да су узорци ABS-а склонији већим димензионалним или позиционим грешкама након обраде, док PLA показује доследнију димензионалну стабилност.

Са аспекта материјала, ABS има углавном већа одступања од PETG-а и PLA, вероватно због својих материјалних карактеристика или специфичности процеса обраде. PETG показује умерене вредности одступања, са нешто већом доследношћу од ABS-а, али мањом од PLA материјала. PLA са најмањим одступањима показује највећу димензионалну стабилност у овој анализи.

Табела 11.18 Вредности одступања дужина и одступања од облика и положаја након резања измерена помоћу 3D скенера

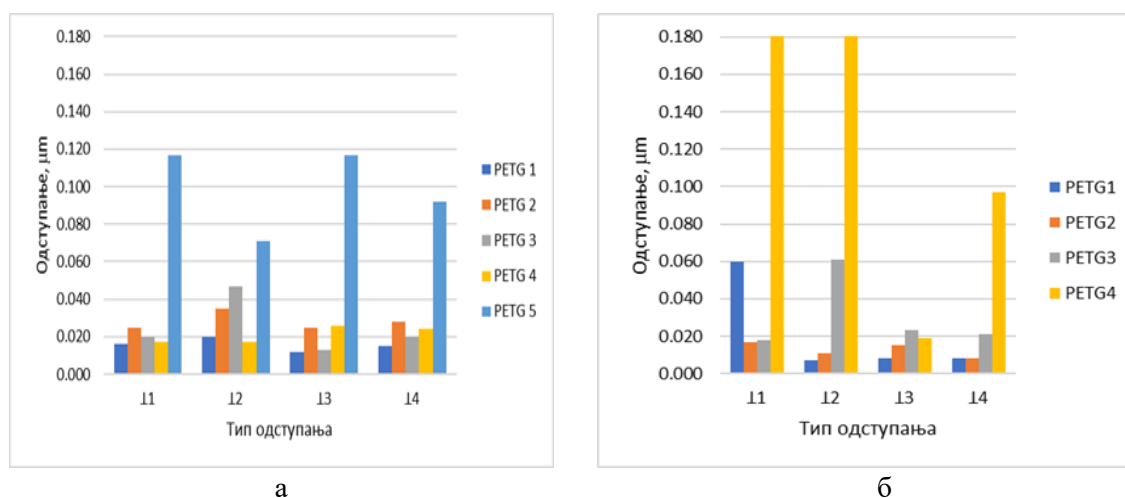
	ABS					PETG					PLA				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
X	19.945	19.622	19.602	19.341	20.131	19.692	19.533	19.381	19.142	19.990	19.632	19.486	19.240	19.044	19.719
Y	19.906	19.703	19.589	19.354	20.162	19.670	19.543	19.364	19.144	19.963	19.630	19.475	19.230	19.032	19.711
11	0.074	0.025	0.040	0.055	0.433	0.016	0.025	0.02	0.017	0.117	0.099	0.027	0.040	0.047	0.141
12	0.239	0.032	0.039	0.036	0.175	0.020	0.035	0.047	0.017	0.071	0.022	0.772	0.092	0.074	0.112
13	0.031	0.038	0.046	0.050	0.152	0.012	0.025	0.013	0.026	0.117	0.043	0.020	0.295	0.270	0.168
14	0.071	0.037	0.335	0.022	0.138	0.015	0.028	0.020	0.024	0.092	0.119	0.048	0.031	0.214	0.105
//1	0.095	0.039	0.085	0.069	0.454	0.023	0.036	0.020	0.027	0.098	0.119	0.020	0.162	0.117	0.140
//2	0.082	0.039	0.320	0.031	0.117	0.026	0.022	0.025	0.035	0.107	0.138	0.058	0.076	0.229	0.096
-1	0.055	0.037	0.291	0.020	0.109	0.015	0.010	0.010	0.019	0.056	0.115	0.046	0.016	0.201	0.094
-2	0.030	0.038	0.042	0.042	0.114	0.012	0.011	0.012	0.015	0.114	0.028	0.016	0.294	0.258	0.138
-3	0.036	0.025	0.029	0.023	0.163	0.004	0.032	0.046	0.011	0.068	0.020	0.761	0.054	0.073	0.106
-4	0.073	0.020	0.025	0.036	0.432	0.007	0.020	0.013	0.016	0.077	0.096	0.011	0.022	0.047	0.131

На слици 11.55 - а приказана су одступања управности (11, 12, 13, 14) измерених скенером и након тога обрађених програмом *GOM inspect*. Приказана одступања изражена су у микрометрима за пет различитих узорака направљених од *ABS* материјала. Примећује се да су одступања за типове 12 и 14 већа код одређених узорака (нпр. *ABS 3* и *ABS 4*), што може указивати на већу варијабилност димензија или површинских несавршености код тих узорака. На слици 11.55 - б приказани су резултати одступања измерени *CMM* машином. Генерално, видљива су мања одступања него код *GOM* мерења, што указује на већу прецизност *CMM* методе. Најмања одступања су за *ABS 1* код 12 и 11, док су највећа одступања у случају *ABS 3* узорка код типа одступања 11.



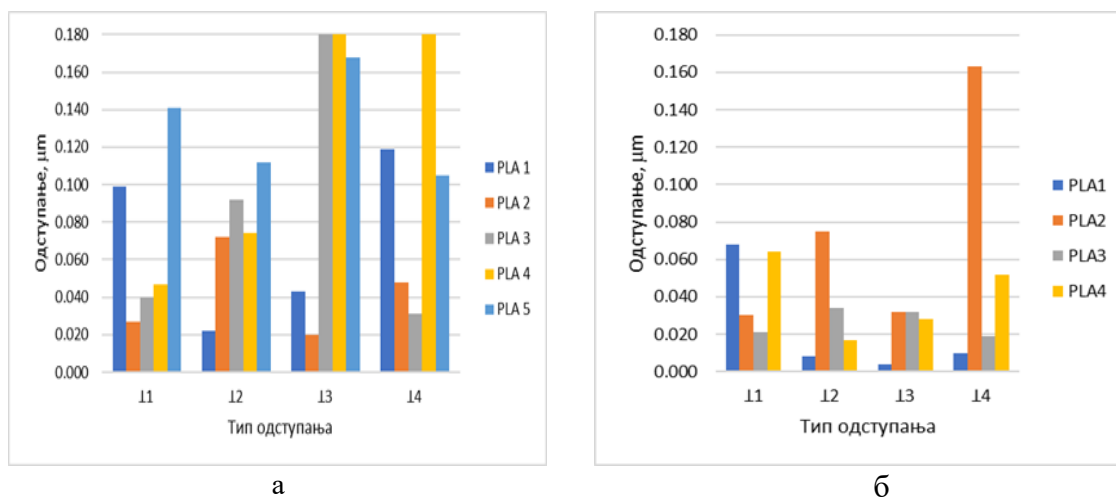
Слика 11.55 Одступања управности *ABS* измерена 3D скенером (а) и *CMM*-ом (б)

На слици 11.56 - а приказана су одступања управности (11, 12, 13, 14) за узорке направљене од *PETG* материјала. Видљива су релативно уједначена одступања у поређењу са *ABS* материјалом. *PETG 5* узорак показује највећа одступања код свих типова одступања, док су остали типови одступања релативно уједначени. Слика 11.56 - б приказује још мања одступања него код *GOM* мерења. *PETG 1* и *PETG 2* су готово савршено конзистентни, док *PETG 4* показује највећа одступања код 11 и 12 типа.



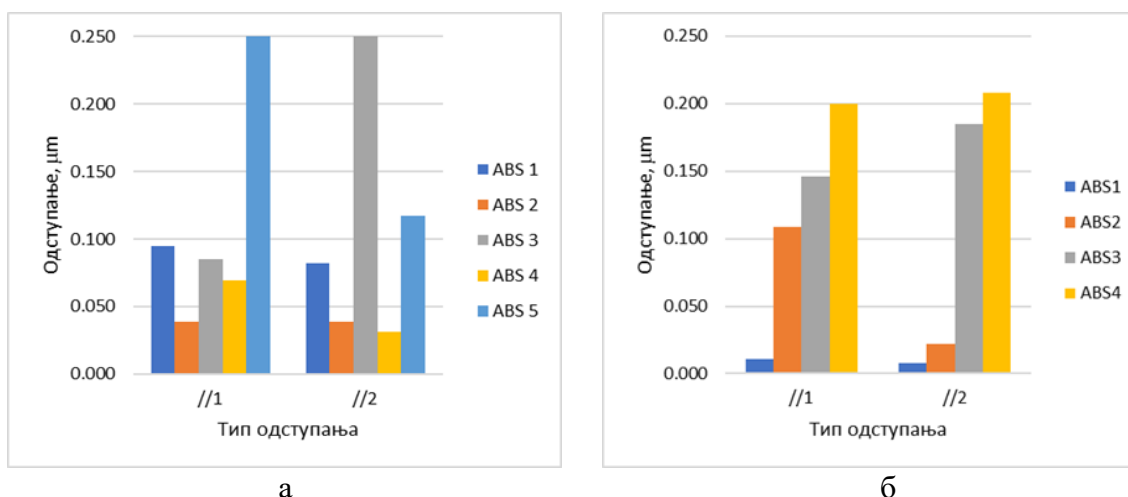
Слика 11.56 Одступања управности *PETG* измерена 3D скенером (а) и *CMM*-ом (б)

На слици 11.57 - а приказана су одступања управности (I1, I2, I3, I4) за узорке направљене од PLA материјала. PLA узорци показују најмања одступања од свих материјала. PLA 3 и PLA 4 узорци имају највећа одступања код I3. На слици 11.57 – б PLA материјал показује нижа одступања, с тим што PLA 2 има доста веће одступање код I4. Генерално, мерења су конзистентна и показују да PLA има стабилне димензије.



Слика 11.57 Одступања управности PLA измерена 3D скенером (а) и CMM-ом (б)

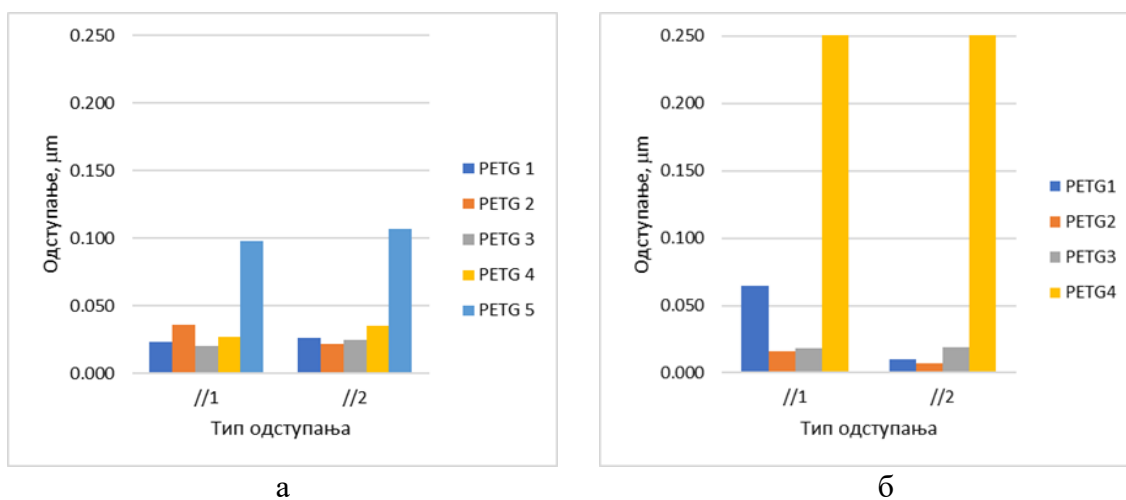
На слици 11.58 - а приказана су одступања паралелности (//1, //2) за узорке направљене од ABS материјала. У овом случају, примећена су већа одступања код ABS 5 узорка за //1 и ABS 3 за //2. Ова одступања могу бити последица начина штампања или несавршености на одређеним местима узорка. На слици 11.58 - б Видимо највеће одступање код ABS 4 за оба типа одступања, док су остали узорци релативно конзистентни. Ова разлика може указивати на специфичну карактеристику ABS 4 узорка која га чини подложнијим одступањима.



Слика 11.58 Одступања паралелности ABS измерена 3D скенером (а) и CMM-ом (б)

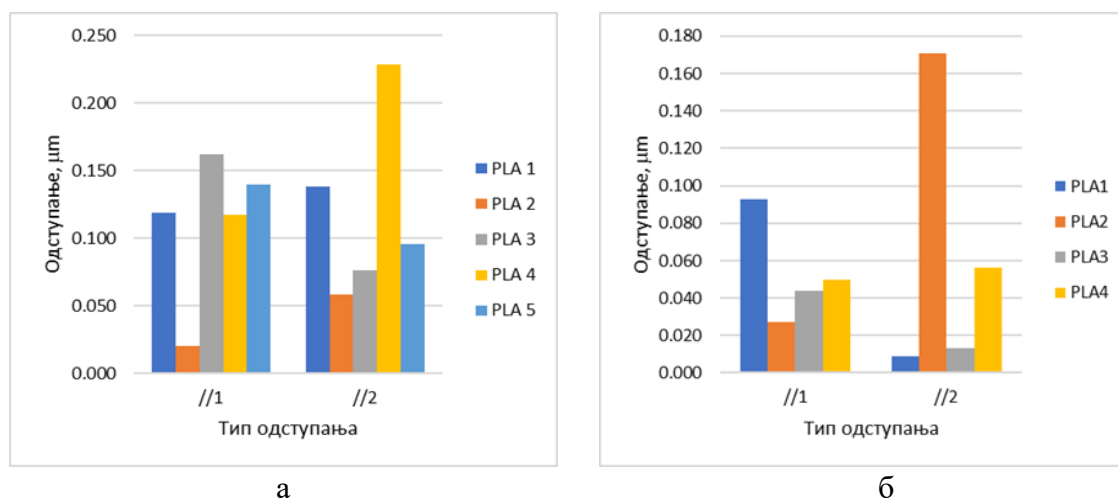
На слици 11.59 - а приказана су одступања паралелности (//1, //2) за узорке направљене од PETG материјала. Овај материјал показује конзистентнија одступања у поређењу са ABS -ом, где PETG 1 има најмање одступање, док PETG 5 показује највеће вредности у оба случаја. На слици 11.59 - б PETG 4 показује највећа одступања код оба типа, док су

остали узорци конзистентни. Ово мерење показује већи степен прецизности за *PETG* материјал у поређењу са *ABS*-ом.



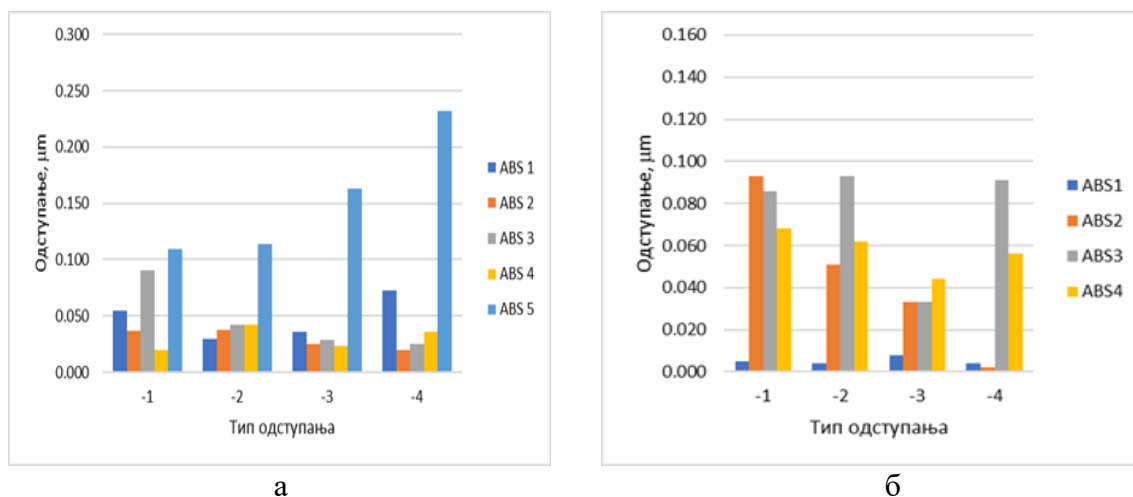
Слика 11.59 Одступања паралелности *PETG* измерена 3D скенером (а) и *CMM*-ом (б)

На слици 11.60 - а приказана су одступања паралелности (*//1*, *//2*) за узорке направљене од *PLA* материјала. *PLA* материјал показује уједначена одступања, где *PLA* 4 показује мало повећање код *//2*. На слици 11.60 - б *PLA* 2 има већа одступања код *//2*, али је генерално прецизност мерења висока.



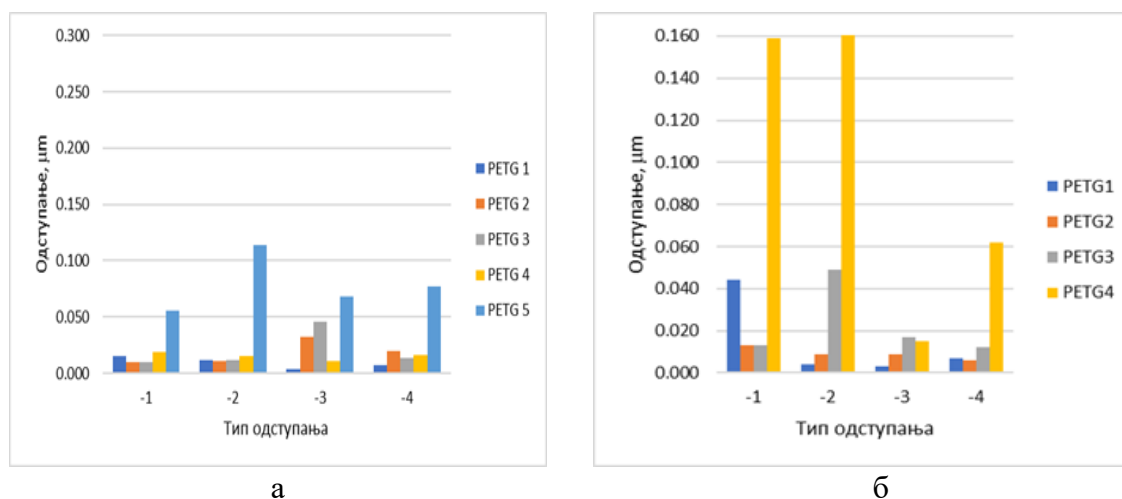
Слика 11.60 Одступања паралелности *PLA* измерена 3D скенером (а) и *CMM*-ом (б)

На слици 11.61 - а приказана су одступања равности (*-1*, *-2*, *-3*, *-4*) за узорке направљене од *ABS* материјала. Примећује се да *ABS* 5 има израженија одступања, посебно за *-4*, што може указивати на специфична места на узорку где долази до већих одступања. На слици 11.61 - б Највећа одступања су за *ABS* 2 и *ABS* 3, док су се одступања код *ABS* 1 знатно смањила, што може потврдити да ови узорци имају димензионалне или површинске несавршености које утичу на прецизност мерења.



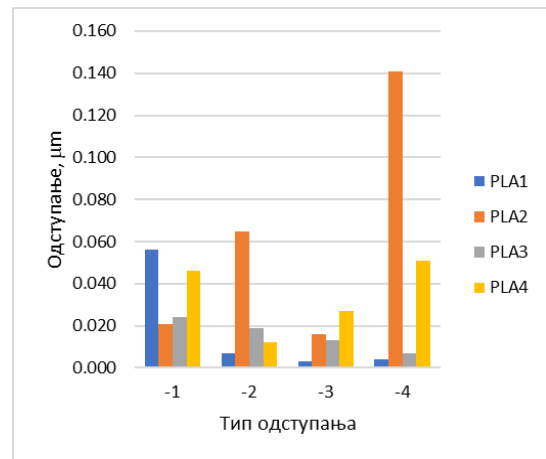
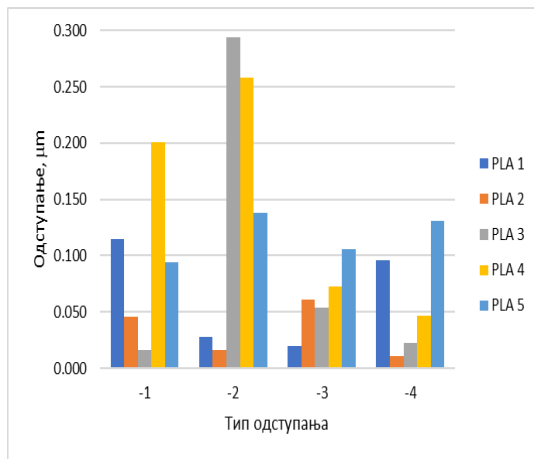
Слика 11.61 Одступања равности ABS измерена 3D скенером (а) и CMM-ом (б)

На слици 11.62 - а приказана су одступања равности (-1, -2, -3, -4) за узорке направљене од PETG материјала. Види се да PETG 3 и PETG 5 показују већа одступања код -3, што може указивати на специфичне карактеристике ових узорака у погледу структуре и стабилности. На слици 11.62 - б PETG 4 има већа одступања од свих узорака за скоро све типове одступања.



Слика 11.62 Одступања равности PETG измерена 3D скенером (а) и CMM-ом (б)

На слици 11.63 - а приказана су одступања равности (-1, -2, -3, -4) за узорке направљене од PETG материјала. Узорци PLA 3 и PLA 4 имају благо већа одступања код -3, али генерално PLA материјал показује висок ниво стабилности и уједначености. На слици 11.63 - б, PLA материјал показује нижа одступања, са малим варијацијама код PLA 2 и PLA 4 за -4, али је уопштено најстабилнији материјал.



а

б

Слика 11.63 Одступања равности PLA измерена 3D скенером (а) и CMM-ом (б)

12. ЗАКЉУЧАК, НАУЧНИ ДОПРИНОС И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

3D штампа је технологија која се веома интензивно развија. Омогућује директно из дигиталног 3D модела израду како прототипа као и функционалног готовог производа веома сложене конфигурације. Како 3D штампа има одређена ограничења са аспекта тачности израде и храпавости добијених површина након 3D штампе неопходна је накнадна најчешће CNC механичка обрада одношењем материјала. У оквиру ове дисертације су извршена потребна истраживања литературних података, неопходни прорачуни и обимна експериментална истраживања са циљем да се успоставе зависности параметара 3D штампе и квалитета добијених делова са аспекта минималне потребне CNC обраде функционалних површина готових делова. На основу експерименталних истраживања могуће је извести велики број закључака.

На основу експерименталних испитивања утицаја броја слојева у зиду и угла испуне испуне на квалитет 3D штампаних епрувета за испитивање затезањем, са аспекта толеранције димензија и одступања површина се могу донети неки од кључних закључака:

- Најмање одступање од паралелности PARL1 и PARL2 су показале епрувете са 3 слоја у зиду, док се одступања повећавају са повећањем броја слојева. Промена угла испуне нема значајнији утицај на одступање од паралелности PARL1 и PARL2.
- Мерење одступања угловности ANGL1, ANGL2 и ANGL3 је показало да је одступање ANGL1, најмање код епрувета са 3 слоја, док су највећа сва угаона одступања код епрувета са 5 слојева највећа. Одступање ANGL2 је најмање код епрувете са 7 слојева, при чему се ово одступање повећава са смањењем броја слојева. Одступање ANGL3 је мање код епрувете са 7 слојева у поређењу са епруветама са 3 и 5 слојева.
- Утицај угла испуне на квалитет епрувета (толеранције израде и мерена одступања паралелности и угловности) у подручју од 0 до 45 степени је занемарљив.
- Познавање утицаја броја слојева у зиду делова добијених 3D штампом може значајно допринети оптимизацији процеса 3D штампе, а све у циљу постизања високог квалитета и димензионе стабилности готових производа добијених овом технологијом.

Експериментална испитивања утицаја параметара 3D штампе на механичка својства, односно затезну чврстоћу штампаних епрувета, су вршена са три различита материјала филамента: PLA, ABS и PETG, при чему је вариран број слојева у зиду епрувета и угао испуне. Анализа добијених резултата указује на следеће закључке:

- Епрувете од *PETG* материјала су показале највећу затезну чврстоћу, нешто мању су имали узорци од *PLA* материјала и знатно мању од *ABS* материјала.
- Са аспекта угла испуне, може се закључити да у случају *PETG* и *PLA* материјала повећање угла од 0° до 45° доводи до благог смањуја затезне чврстоће, док код *ABS* епрувета нема значајне разлике.
- Са повећањем броја слојева у зиду код свих епрувета расте затезна чврстоћа.
- Промена угла испуне не утиче на промену вредности издужења епрувета током испитивања на затезање.
- Повећање броја слојева у зиду повећава издужење епрувета. Ово је изражено код епрувета од *PLA* и *PETG* материјала.
- Код епрувета од *PLA* материјала, види се ефекат промене броја слојева у зиду, јер 3 слоја у зиду остављају довољно простора за слојеве испуне, 7 слојева у зиду испуњавају централни део, и дају већу затезну чврстоћу, док код 5 слојева у зиду нема довољно простора за квалитетну испуну и слојеви нису добро залепљени.
- Ефекат пуњења *PLA* материјалом код узорака са 5 слојева у зиду је знатно бољи него код узорака са 5 слојева у зиду од *ABS* и *PETG* материјала, односно долази до деламинације, односно смањења адхезије између слојева.

Разлози за уочене разлике између затезних чврстоћа могу се наћи у чињеници да су испитивани узорци израђени од различитих материјала са различитим механичким карактеристикама (затезна чврстоћа и др.) као и различитим својствима адхезије између нити филамента.

Ови резултати представљају део прелиминарног истраживања и указују на правац у коме треба да се наставе будућа истраживања механичких особина како материјала који се користе у *3D* штампи, тако и готових штампаних делова.

Даља истраживања треба да, поред својстава различитих материјала, узму у обзир параметре *3D* штампе као што су пречник млазнице, угао испуне, број слојева зида, дебљину слоја, брзина штампе, температуре, итд., како би се добио модел помоћу кога би се могао прецизније предвидети квалитет штампаних делова и утицај појединих параметара штампе. Да би се дошло до поузданог модела потребно је укључити и доступне информације (базе података) претходних истраживања.

Технологије и материјали у области *3D* штампе имају велики потенцијал за даља истраживања утицаја параметара *3D* штампе и накнадне обраде на топографију површине и триболошке карактеристике. У овом истраживању анализирани су резултати мерења храпавости површина и коефицијента трења и вредности ширине трага хабања након испитивања на трибометру. Адекватним избором технолошког поступка обраде након *3D* штампе може се значајно смањити храпавост штампане

површине. Најмања хрпавост се постиже полирањем и хемијским треманом ацетоном. Глодањем се такође може остварити мала хрпавост површине. Брушењем узорака не постиже се значајно смањење хрпавости услед лепљења честица *PLA* материјала у брусно средство.

Анализом резултата триболошких испитивања може се закључити да различите врсте обраде површина након *3D* штампе имају утицај на вредност коефицијента трења и ширину трага хабања код испитиваних узорака. Најмањи коефицијент трења је код узорака обрађених глодањем а највећи код брушених узорака, док је најмања ширина трага хабања код узорака третираних ацетоном, а највећа код глоданих узорака.

У експерименту моделирање и предвиђање хрпавости површине у хибридном производном процесу коришћењем вештачких неуронских мрежа, циљ је био одређивање модела за предвиђање хрпавости површине у хибридном производном процесу коришћењем *MRA* и *ANN*. После процеса *FDM 3D* штампе, део је машински обрађен операцијом глодања како би се побољшао квалитет површине, мењајући брзину резања, брзину помака и дубину резања. Након анализе може се закључити следеће:

- Моделирањем помоћу *ANN* и *MRA* може се ефикасно предвидети хрпавост површине, при чему је *ANN* бољи од *MRA*. Модели са више улазних параметара (48 у овом случају) дају боља предвиђања од оних са мање параметара (27 у претходном истраживању).
- Модел *ANN* који је користио функцију активације *ReLU* дао је боља предвиђања од модела са функцијом активације *tanh*.
- *ANN* модели са мањим бројем неурона и скривеним слојевима дају боља предвиђања за мали број параметара обуке због компликоване мреже неурона. Сама *ANN* мрежа има превише параметара у односу на број примера обуке.
- Најбоље измерена хрпавост површине била је $1.958 \mu\text{m}$. У случају *MRA*, ово је измерено на $2.372 \mu\text{m}$ и израчунато на $2,14 \mu\text{m}$, док је код *ANN* измерено на $2.058 \mu\text{m}$ и израчунато на $2.056 \mu\text{m}$.
- Сви *ANN* модели предвиђају висок квалитет површине при брзини од 3000 или 1000 о/min, брзини помака од 400 mm/min и дубини резања од 0.3 mm.
- Највећи степен корелације (коефицијент детерминације) $R^2 = 0.9771$ постигао је модел *ANN 5-S-R*, док су *MRA* методе дале мању корелацију.

ANN су моћан алат са компликованим мрежама неурона. Дакле, за прецизније предвиђање квалитета површине и тачнији модел, потребно је повећати број улазних параметара. Ово би се могло остварити обједињавањем досадашњих резултате многих истраживача и стварањем велике базе података.

Анализом резултата из приложеног документа могу се извући следећи закључци за експеримент о побољшању димензионалне и геометријске тачности, као и храпавости површине делова након *CNC* обраде.

Са аспекта димензионалне стабилности материјала, узорци од *ABS* материјала показују димензионалну стабилност са мањим одступањима пре обраде, док је након обраде видљиво смањење нетачности димензија и грешака облика, што указује да је *CNC* обрадом дошло до успешног побољшања димензионалне тачности. Узорци од *PETG* материјали су имали већа одступања у поређењу са узорцима *ABS*-а, нарочито у *X* правцу, али након обраде констатовано је побољшање тачности димензија. Узорци од *PLA* материјала имају већу тачност у *Y* правцу, али одступања у *X* правцу су била приметна. Након *CNC* обраде, узорци од *PLA* материјала показују знатно мања одступања, што потврђује ефикасност ове обраде.

У случају одступања од облика и положаја, код свих материјала, одступања од управности и паралелности су значајно смањена након обраде. Код узорака од *ABS*-а су била највећа одступања, док су код узорака од *PETG*-а и *PLA*-а била мања, при чему су код свих узорака одступања након обраде смањена.

Са аспекта побољшања површинске храпавости, код узорака од *PLA* материјала, храпавост површине је значајно смањена обрадом, пре обраде *Ra* је била 5.574 μm , док након обраде има знатно нижу вредност *Ra* од 1.064 μm . Ово указује да *CNC* глодање има велики утицај на побољшање површинске обраде. Такође, параметари обраде као што је дубина резања има директан утицај на храпавост површине, при чему се са повећањем дубине резања повећава и храпавост. Ове анализе потврђују ефикасност *CNC* обраде у побољшању димензионалне тачности, смањењу геометријских одступања и побољшању храпавости површине за све коришћене материјале (*ABS*, *PETG*, и *PLA*).

У случају одређивања димензионалне и геометријске тачности помоћу *3D* скенера, са аспекта прецизности и стабилности материјала, *PLA* материјал показује најмања одступања у односу на остале материјале, што указује на његову високу димензионалну стабилност након обраде. *PETG* је средње стабилан материјал, са конзистентнијим одступањима у поређењу са *ABS*-ом, али ипак нешто већим одступањима него *PLA*. *ABS* материјал показује највећа одступања, што сугерише склоност ка већим димензионалним грешкама, вероватно због специфичних карактеристика материјала или процеса обраде.

Са аспекта прецизности метода мерења, види се да мерења добијена координатном мерном машином (*CMM*) показују мања одступања у односу на мерења помоћу *3D* скенера и *GOM inspect* софтвера, што указује на већу прецизност *CMM*-а за ову врсту испитивања. Код мерења помоћу *3D* скенера, варијабилност одступања је већа, нарочито код узорака од *ABS* и *PETG*, што може бити последица специфичности методе мерења или површинских карактеристика материјала.

У случају одступања по X и Y координатама, узорци су углавном конзистентно позиционирани, с тим да ABS има највећа одступања, док PLA показује стабилност у свим правцима.

Одступања управности (I_1, I_2, I_3, I_4) су најизраженија код узорака од ABS материјала, где одређени узорци показују варијабилност која може указивати на димензионалне несавршености. Узорци од $PETG$ имају уједначенија одступања, док узорци од PLA имају најнижа одступања управности. Слично, одступања паралелности и равности су најмања код узорака од PLA , док узорци од ABS имају највеће варијације, посебно код равности.

Са аспекта утицаја обраде на одступања, може се видети да након CNC обраде, узорци од ABS показују већа димензионална одступања, док су узорци од $PETG$ и PLA стабилнији. Разлог за то може бити комбинација механичких својстава и карактеристика обраде. Ови закључци указују на то да узорци од PLA имају најстабилније димензије и могу имати примену за прецизне делове, док делови од ABS захтевају додатну контролу у накнадну обраду због тенденције ка већим одступањима.

Са аспекта дубине резања, можемо закључити да дубина резања од 0.2 и 0.3 mm омогућава баланс између квалитета обрађене површине и ефикасности процеса обраде, смањујући храпавост уз задржавање прихватљиве брзине обраде.

Научни допринос ове дисертације се огледа у истраживањима унапређењу квалитета делова добијених помоћу $3D$ штампе и применом CNC глодања за накнадну обраду. Кроз експерименте на различитим полимерним материјалима ($ABS, PETG, PLA$), истраживање је показало да се применом CNC обраде може значајно побољшати димензиона тачност и смањити храпавост површине. Примена вештачких неуронских мрежа омогућила је креирање модела за предикцију утицаја параметара обраде на квалитет површине, што омогућује оптимизацију процеса. Резултати пружају индустрији конкретне смернице за избор оптималних параметара обраде за постизање потребног квалитета завршне обраде $3D$ штампаних делова.

Хибридни приступ израде делова омогућава искоришћавање предности обе технологије – флексибилност и брзину $3D$ штампе за израду делова сложене геометрије, уз високу прецизност и завршну обраду функционалних површина коју пружа CNC глодање. Резултати указују да хибридни процес може смањити храпавост површине, повећати димензиону тачност и побољшати укупни естетски и функционални квалитет обрађених делова.

Даља истраживања се могу се одвијати у неколико праваца:

- Истраживања квалитета израде делова $3D$ штампом од других полимерних и металних материјала и композита, како са аспекта механичких особина, тако и тачности димензија, облика и положаја површина,

- Испитивање обрадивости *CNC* глодањем делова од различитих врста материјала добијених *3D* штампом,
- Испитивање обрадивости бушењем делова од различитих врста материјала добијених *3D* штампом,
- Испитивања триболошких карактеристика, посебно нових трибо материјала намењених за *3D* штампу,
- Употреба напредних метода предвиђања, које поред вештачких неуронских мрежа, могу укључивати и многе друге методе вештачке интелигенције, могу помоћи у прецизнијој предикцији утицаја параметара обраде на квалитет површине.

Аутоматизација и роботизација хибридних процеса представља још један правац са којим треба надовезати реализована истраживања. Потребно је развити аутоматизоване системе који би омогућили аутоматизовану *CNC* обраду након *3D* штампе, чиме би се убрзао процес и смањила могућност људске грешке.

13. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ramya, A., Vanapalli, S. L. (2016) 3D printing technologies in various applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(3), 396-409.
- [2] Ortiz, J. H. (2020) Industry 4.0: Current status and future trends, *IntechOpen*, London, United Kingdom
- [3] Wu, P., Wang, J., Wang, X. (2016) A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21-31.
- [4] Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R. (2016) Categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond, *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173-178.
- [5] Subagio, D.G., Subekti, R.A., Saputra, H.M., Rajani, A., Sanjaya, K.A. (2019) Three axis deviation analysis of CNC milling machine, *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 93-101
- [6] Budak, E. (2006) Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 1478–1488.
- [7] Ginting, R., Hadiyoso, S., Aulia, S. (2017) Implementation 3-Axis CNC Router for Small Scale Industry, *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 17 (2017) pp. 6553-6558
- [8] Hurem, N. Hodzic, D. (2019) Using CAD/CAM program aspire for modeling and making relief surface. *12th International Scientific Conference on Production Engineering development and modernization of production*.
- [9] Aćimović, B., Čomić, B., Kolak, J., Mićović, T., Sekerež, D. (2013) Brza izrada prototipa primjenom 3D štampača, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 12.
- [10] Haocheng, D., Shaoqian, C. (2020) Development and Application of 3D Printing and Its Materials. *Insight - Material Science*, Volume 3 Issue 2 |P.28-31.
- [11] Botao, H., Guomin, L. (2020) 3D Printing Technology and Its Application in Industrial Manufacturing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 782. 022065.
- [12] Ashtankar, K. M., Kuthe, A. M., Rathour, B. S. (2013). Effect of build orientation on mechanical properties of rapid prototyping (fused deposition modelling) made acrylonitrile butadiene styrene (abs) parts. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 56406, p. V011T06A017). American Society of Mechanical Engineers
- [13] Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S. H., Wright, P. K. (2001). Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers*, 10(13552540210441166), 1-21.
- [14] Gunasekaran, K. N., Aravinth, V., Kumaran, C. M., Madhankumar, K., & Kumar, S. P. (2021). Investigation of mechanical properties of PLA printed materials under varying infill density. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1849-1856.

- [15] Dawoud, M., Taha, I., Ebeid, S. J. (2016). Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of manufacturing Processes*, 21, 39-45
- [16] Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143-157.
- [17] Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2018). Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment. *Materials*, 11(4), 500
- [18] Liu Y., Jiang W., Hu W., Ren L., Deng E., Wang Y., Song C., Feng Q. (2023). Compressive strength and energy absorption characteristics of the negative stiffness honeycomb cell structure". *Materials Today Communications* doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105498.
- [19] Mishra, S. B., Mahapatra, S. S. (2014). Improvement in tensile strength of FDM built parts by parametric control. *Applied Mechanics and Materials*, 592, 1075-1079.
- [20] Rodríguez-Panes, A., Claver, J., Camacho, A. M. (2018). The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis. *Materials*, 11(8), 1333
- [21] Dwiwati, S. T., Kholil, A., Riyadi, R., Putra, S. E. (2019, December). Influence of layer thickness and 3D printing direction on tensile properties of ABS material. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1402, No. 6, p. 066014). IOP Publishing
- [22] Nikiema, D., Sène, N. A., Baland, P., Sergent, A. (2023). Study of walls' influence on the mechanical properties of 3D printed onyx parts: Experimental, analytical and numerical investigations. *Heliyon*, 9(8).
- [23] Eryldz, M. (2022). Comparison of Maximum Number of Walls and 100% Infill Density Parameters on Flexural Strength to Obtain FDM Build 3D Solid Parts", *1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS*
- [24] Eryıldız, M. (2021). Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: an experimental investigation. *European Mechanical Science*, 5(3), 116-120.
- [25] Ćwikła, G., Grabowik, C., Kalinowski, K., Paprocka, I., Ociepka, P. (2017, August). The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 227, No. 1, p. 012033). IOP Publishing
- [26] Tymrak, B. M., Kreiger, M., Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246.
- [27] Cupar, A., Pogačar, V., Stjepanovič, Z. (2015). Shape verification of fused deposition modelling 3D prints. *International journal of information and computer science*, 4(0),1.
- [28] Gurralla, P. K., Regalla, S. P. (2014). Friction and wear behavior of abs polymer parts made by fused deposition modeling (FDM). *Technol. Lett*, 1, 13-17

- [29] Norani, M. N. M., Abdollah, M. F. B., Abdullah, M. I. H. C., Amiruddin, H., Ramli, F. R., Tamaldin, N. (2020). Correlation of tribo-mechanical properties of internal geometry structures of fused filament fabrication 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene. *Industrial Lubrication and Tribology*, 72(10), 1259-1265.
- [30] Garg, H. K., Singh, R. (2015). Comparison of wear behavior of ABS and Nylon6—Fe powder composite parts prepared with fused deposition modelling. *Journal of Central South University*, 22, 3705-3711.
- [31] Hanon, M. M., Kovács, M., Zsidai, L. (2019). Tribology behaviour investigation of 3D printed polymers. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 10(2), 173-181.
- [32] Roy, R., Mukhopadhyay, A. (2021). Tribological studies of 3D printed ABS and PLA plastic parts. *Materials Today: Proceedings*, 41, 856-862.
- [33] Nedic, B., Slavković, L., Đuric, N., Adamovic, D., Mitrovic, S. (2019). Surface roughness quality, friction and wear of parts obtained on 3D printer.
- [34] Tahir, N. A. M., Azmi, M. S., Abdollah, M. F. B., Ramli, F. R., Amiruddin, H., Tokoroyama, T., Umehara, N. (2018). Tribological properties of 3D-printed pin with internal structure formation under dry sliding conditions. *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day, 2018*, 260-261.
- [35] Boparai, K., Singh, R., Singh, H. (2015). Comparison of tribological behaviour for Nylon6-Al-Al₂O₃ and ABS parts fabricated by fused deposition modelling: This paper reports a low cost composite material that is more wear-resistant than conventional ABS. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(2), 59-66.
- [36] Cococchetta, N., Jahan, M. P., Schoop, J., Ma, J., Pearl, D., Hassan, M. (2021). Post-processing of 3D printed thermoplastic CFRP composites using cryogenic machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 332-346.
- [37] Jenarathanan, M. P., Jeyapaul, R. (2013). Optimisation of machining parameters on milling of GFRP composites by desirability function analysis using Taguchi method. *International journal of Engineering, science and Technology*, 5(4), 22-36
- [38] Abdul Shukor, J., Said, S., Harun, R., Husin, S., Kadir, A. (2016). Optimising of machining parameters of plastic material using Taguchi method. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(1), 50-56.
- [39] Saad, M. S., Mohd Nor, A., Abd Rahim, I., Syahrudin, M. A., Mat Darus, I. Z. (2022). Optimization of FDM process parameters to minimize surface roughness with integrated artificial neural network model and symbiotic organism search. *Neural Computing and Applications*, 34(20), 17423-17439.
- [40] Boschetto, A., Giordano, V., Veniali, F. (2013). Surface roughness prediction in fused deposition modelling by neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 2727-2742.
- [41] García Plaza, E., López, P. J. N., Torija, M. Á. C., Muñoz, J. M. C. (2019). Analysis of PLA geometric properties processed by FFF additive manufacturing: Effects of process parameters and plate-extruder precision motion. *Polymers*, 11(10), 1581.

- [42] Lyu, J., Manoochehri, S. (2019). Dimensional prediction for FDM machines using artificial neural network and support vector regression. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 59179, p. V001T02A033). American Society of Mechanical Engineers
- [43] Nagarajan, H. P., Mokhtarian, H., Jafarian, H., Dimassi, S., Bakrani-Balani, S., Hamed, A., Haapala, K. R. (2019). Knowledge-based design of artificial neural network topology for additive manufacturing process modeling: A new approach and case study for fused deposition modeling. *Journal of Mechanical Design*, 141(2), 021705
- [44] Kandananond, K. (2021). Surface roughness prediction of FFF-fabricated workpieces by artificial neural network and Box–Behnken method. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 12, 17
- [45] Reeves, P. E., Cobb, R. C. (1995). Surface deviation modeling of LMT Processes—a comparative analysis. *Proceedings of Fifth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*
- [46] Ahn, D., Kweon, J. H., Kwon, S., Song, J., Lee, S. (2009). Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5593-5600
- [47] Pămărac, R. G., Petrușe, R. E. (2018). Study regarding the optimal milling parameters for finishing 3D printed parts from ABS and PLA materials. *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, 70(1), 66-72.
- [48] Amanullah, A. N. M., Saleh, T., Khan, R. (2017). Design and development of a hybrid machine combining rapid prototyping and CNC milling operation. *Procedia Engineering*, 184, 163-170.
- [49] Grguraš, D., Kramar, D. (2017). Optimization of hybrid manufacturing for surface quality, material consumption and productivity improvement. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 63(10), 567-576
- [50] Li, L., Haghghi, A., Yang, Y. (2019). Theoretical modelling and prediction of surface roughness for hybrid additive–subtractive manufacturing processes. *IISE Transactions*, 51(2), 124-135.
- [51] Kulkarni, P., Dutta, D. (1998, September). On the integration of layered manufacturing and material removal processes. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 80326, p. V002T02A030). American Society of Mechanical Engineers.
- [52] Boschetto, A., Bottini, L., Veniali, F. (2016). Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 92-101.
- [53] Pandey, P. M., Reddy, N. V., Dhande, S. G. (2003). Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *Journal of materials processing technology*, 132(1-3), 323-331
- [54] Keresztes, R., Kalácska, G., Zsidai, L., Dobrocsi, Z. (2011). Machinability of engineering polymers. *International Journal of Sustainable Construction and Design*, 2(1)
- [55] Noorani, R (2018) *3D Printing, Technology, Applications and Selection*, CRC Press, Boca Ratón, Florida (US)

- [56] Adeniji, D., Schoop, J., Gunawardena, S., Hanson, C., Jahan, M. (2020). Characterization and modeling of surface roughness and burr formation in slot milling of polycarbonate. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(2), 59
- [57] Hussain, S. A., Pandurangadu, V., Kumar, K. P. (2011). Machinability of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(4)
- [58] Ramulu, M., Arola, D., Colligan, K. (1994). Preliminary investigation of effects on the surface integrity of fiber reinforced plastics. In *ESDA* (Vol. 64, pp. 93-101)
- [59] Wang, H., Sun, J., Zhang, D., Guo, K., Li, J. (2016). The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 91, 380-387.
- [60] Benardos, P. G., Vosniakos, G. C. (2002). Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 18(5-6), 343-354.
- [61] Beatrice, B. A., Kirubakaran, E., Thangaiah, P. R. J., Wins, K. L. D. (2014). Surface roughness prediction using artificial neural network in hard turning of AISI H13 steel with minimal cutting fluid application. *Procedia Engineering*, 97, 205-211.
- [62] Nalbant, M., Gokkaya, H., Toktaş, İ. (2007). Comparison of regression and artificial neural network models for surface roughness prediction with the cutting parameters in CNC turning. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2007(1), 092717.
- [63] Hussein, H. K., Shareef, I. R., Zayer, I. A. (2022). Comparative Prediction and Modelling of Surface Roughness in Milling of AL-7075 Using Regression Analysis and Neural Network. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 9(1)
- [64] Meral, G., Dilipak, H., Sarıkaya, M. (2011). Modeling with Regression Methods of the Thrust Forces and The Surface Roughness in The Drilling of AISI 1050 Materials. *Turkish Science Research Foundation*, 4, 31-41.
- [65] Asiltürk, I., Çunkaş, M. (2011). Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert systems with applications*, 38(5), 5826-5832
- [66] Lin, Y. C., Wu, K. D., Shih, W. C., Hsu, P. K., Hung, J. P. (2020). Prediction of surface roughness based on cutting parameters and machining vibration in end milling using regression method and artificial neural network. *Applied Sciences*, 10(11), 3941.
- [67] Yilmaz, S., Arici, A. A., Feyzullahoglu, E. (2011). Surface roughness prediction in machining of cast polyamide using neural network. *Neural Computing and Applications*, 20, 1249-1254.
- [68] Tsai, Y. H., Chen, J. C., Lou, S. J. (1999). An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(4), 583-605.
- [69] Zain, A. M., Haron, H., Sharif, S. (2010). Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1755-1768.

- [70] Shie, J. R. (2006). Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end-milling process by artificial neural networks: a case study. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(8), 838-845.
- [71] Jafarian, F., Taghipour, M., Amirabadi, H. (2013). Application of artificial neural network and optimization algorithms for optimizing surface roughness, tool life and cutting forces in turning operation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, 1469-1477.
- [72] Kosarac, A., Mladjenovic, C., Zeljkovic, M., Tabakovic, S., Knezev, M. (2022). Neural-network-based approaches for optimization of machining parameters using small dataset. *Materials*, 15(3), 700
- [73] Yanis, M., Mohruni, A. S., Sharif, S., Yani, I., Arifin, A., Khona'Ah, B. (2019). Application of RSM and ANN in predicting surface roughness for side milling process under environmentally friendly cutting fluid. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1198, No. 4, p. 042016). IOP Publishing
- [74] Karayel, D. (2009). Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network. *Journal of materials processing technology*, 209(7), 3125-3137
- [75] Dhokia, V. G., Kumar, S., Vichare, P., Newman, S. T., Allen, R. D. (2008). Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(2), 137-157.
- [76] Susanto, B., Rashid, M. I., Tanbar, F., Ariyadi, H. M., Muflikhun, M. A. (2024) Surface roughness and dimension accuracy data from hybrid manufacturing process using PLA material. *Data in Brief*, 54, 110477.
- [77] Ameta, G., Witherell, P., Moylan, S., Lipman, R. (2015) Tolerance specification and related issues for additively manufactured products. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 57045, p. V01AT02A027). American Society of Mechanical Engineers.
- [78] Zupan, S., Kunc, R. (2024). Overview of Principles and Rules of Geometrical Product Specifications According to the Current ISO Standards. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 70(1-2), 3-19.
- [79] Humienny, Z. (2021) State of art in standardization in the geometrical product specification area a decade later. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 42-51.
- [80] Jafri, K., Ramli, R., Azman, A. H. (2021) Development of evaluation method for geometrical tolerance value of positional characteristic in rotational shaft. *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(3), 2464-2486.
- [81] Wang, S., Liu, S., Mao, Q. (2020). A CMM-Based method of control point position calibration for light pen coordinate measuring system. *Sensors*, 20(19), 5592
- [82] Artkin, F. (2023). CMM machines and industrial applications. In *1st International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences, Konya* (pp. 1029-1033).
- [83] Ireland, A. J., McNamara, C., Clover, M. J., House, K., Wenger, N., Barbour, M. E., ... & Sandy, J. R. (2008). 3D surface imaging in dentistry—what we are looking at. *British dental journal*, 205(7), 387-392

- [84] Zaimović-Uzunović, N., Lemeš, S., Denjo, D., & Softić, A. (2009). *Proizvodna mjerenja*. Univerzitet u Zenici
- [85] <https://hexagon.com/resources/resource-library/intro-coordinate-metrology>(Jyл 2024)
- [86]<https://theengineeringblog.com/coordinate-measuring-machine-working-types-applications-advantages-software-sensors-calibration/>(Jyл 2024)
- [87]<https://www.cmmxyz.com/blog/different-types-of-cmm-machines-how-to-choose-a-cmm-machine/>(Jyл 2024)
- [88]<https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/large-cmms/mmz-t.html>(Jyл 2024)
- [89] Nikam, R. R. (2018). Coordinate Measuring Machine (CMM). *International Journal of Mechanical and Industrial Technology ISSN, 2348-7593*
- [90] <https://www.cmmxyz.com/blog/different-types-of-cmm-machines-how-to-choose-a-cmm-machine/>(Jyл 2024)
- [91] <https://eylemet.com/2019/03/27/types-of-coordinate-measuring-machine/>(Jyл 2024)
- [92] https://www.creaform3d.com/blog/what-is-cmm-and-their-types/#Cantilever_CMM(Jyл 2024)
- [93] <https://www.smlease.com/entries/manufacturing/what-is-cmm-machine/>(Jyл 2024)
- [94] <https://autoprotoway.com/what-is-coordinate-measuring-machine/>(Jyл 2024)
- [95] <https://megatechthailand.com/en/measurement/the-advantages-of-horizontal-arm-coordinate-measuring-machines%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B/>(Jyл 2024)
- [96] Horinov, S., & Kholkhujayev, J. (2018). 3 Tips for Choosing the Best Coordinate Measuring Machine for Quality Process. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*, 8(1), 10
- [97] <https://apimetrology.com/horizontal-cmm/>(Jyл 2024)
- [98] Kochov, A., Stoleska, L. (2022). Methodology of Reverse Engineering Implemented in the Process of Digitalization and Conservation of Wooden Carvings. *Tehnički glasnik*, 16(1), 121-128
- [99] <https://voxellab.rs/3d-skeniranje/>(Jyл 2024)
- [100] Bradley, C., Currie, B. (2005). Advances in the field of reverse engineering. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(5), 697-706
- [101] Mayer, R. (1999). *Scientific Canadian: invention and innovation from Canada's national research council*. Raincoast Books
- [102] Abdelhafiz, A. (2009). *Integrating digital photogrammetry and terrestrial laser scanning*. Techn. Univ., Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie
- [103] Georgopoulos, A., Ioannidis, C., Valanis, A. (2010). Assessing the performance of a structured light scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 251-255.

- [104] <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/#!> (Jyл 2024)
- [105] Burtch, R. (2004). History of photogrammetry: Notes of the Center for Photogrammetric Training. *Ferris State University, USA*.
- [106] Gruen, A. (1997). Fundamentals of videogrammetry—A review. *Human movement science*, 16(2-3), 155-187
- [107] <https://www.clemson.edu/centers-institutes/conservation/equipment/photogrammetry.html>(Jyл 2024)
- [108] Arbutina, M., Dragan, D., Mihic, S., & Anisic, Z. (2017). Review of 3D body scanning systems. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 10(1), 17
- [109] Altuntas, C. (2021). Triangulation and time-of-flight based 3D digitisation techniques of cultural heritage structures. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 825-830.
- [110] Shepp, L. A., Kruskal, J. B. (1978). Computerized tomography: The new medical X-ray technology. *The American Mathematical Monthly*, 85(6), 420-439.
- [111] <https://www.volumegraphics.com/en/solutions/industrial-ct-guide.html#why02>(Jyл 2024)
- [112] Memon, N. A., Pathan, A. A., Pathan, A. F. H., Yusoff, N. I. M., Mubarak, M. A. (2016). Investigation of Hot storage stability of CRMB using X-Ray computed tomography. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(3), 1489-1500.
- [113] <https://tolerancije.wordpress.com/>(Jyл 2024)
- [114] <https://www.timesaversint.com/knowledge-base/surface-roughness/>(Jyл 2024)
- [115] https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/equipment/surface_01.jsp(Jyл 2024)
- [116] <https://www.tribonet.org/wiki/stylus-profilometera-stylus-profilometer-is-a-contact-based-profilometer-that-brings-its-stylus-tip-into-direct-contact-with-the-measuring-surface-and-traces-the-desired-path-to-determine-the-topograp/>(Jyл 2024)
- [117] <https://at-machining.com/surface-finish-chart/>(Jyл 2024)
- [118] https://www.tribonet.org/wiki/surface-roughness-measurement/#Contact-based_measurement_Stylus_measurement(Jyл 2024)
- [119] Meincken, M. (2007). Atomic force microscopy to determine the surface roughness and surface polarity of cell types of hardwoods commonly used for pulping. *South African journal of science*, 103(1-2), 4-6
- [120] Brabazon, D. (2018). Nanocharacterization techniques for dental implant development. In *Emerging nanotechnologies in dentistry* (pp. 327-354). William Andrew Publishing.
- [121] De Oliveira, R. R. L., Albuquerque, D. A. C., Cruz, T. G. S., Yamaji, F. M., Leite, F. L. (2012). Measurement of the nanoscale roughness by atomic force microscopy: basic principles and

applications. *Atomic force microscopy-imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale*, 3.

[122] Schneckenburger, H., Richter, V. (2021). Laser scanning versus wide-field—choosing the appropriate microscope in life sciences. *Applied sciences*, 11(2), 733

[123] Lukianowicz, C., & Karpinski, T. (2000, September). Scatterometry Of Machined Surfaces. In *Proceedings of the XVI IMEKO World Congress, Vienna, Austria* (pp. 25-28)

[124] O'Mahony, C., Hill, M., Brunet, M., Duane, R., Mathewson, A. (2003). Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry. *Measurement Science and Technology*, 14(10), 1807.

[125] Hidemitsu, O. G. A. W. A., Akira, H. I. R. A. B. A. Y. A. S. H. I., & Katsuichi, K. I. T. A. G. A. W. A. (2001). Sampling theorem for surface profiling by white light interferometry. *Proc. SAMPTA*, 91-96.

[126] Elser, A., Königs, M., Verl, A., Servos, M. (2018) On achieving accuracy and efficiency in Additive Manufacturing: Requirements on a hybrid CAM system. *Procedia CIRP*, 72, 1512-1517.

[127] Matos, M. A., Rocha, A. M. A., Pereira, A. I. (2020) Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 1993-2005.

[128] Luo, X., Qin, Y. (2018) Hybrid Machining: Theory, Methods, and Case Studies.

[129] Saxena, K. K., Bellotti, M., Qian, J., Reynaerts, D., Lauwers, B., Luo, X. (2018) Overview of hybrid machining processes. *Hybrid Machining*, 3, 21-41.

[130] Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S. (2010) Rapid prototyping: principles and applications. *World scientific*

[131] Lazarević, D. (2018) *Regenerisanje NC koda primenom 3D identifikacije i analize geometrijskih odstupanja*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу

[132] ISO/TC213: ISO 286-1:2010: (2010) Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits

[133] Schleich, B., Wartzack, S. (2015) Evaluation of geometric tolerances and generation of variational part representatives for tolerance analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79, 959-983.

[134] Smith, J. (2022) Machining Surface Finish, *Journal of Manufacturing Science*, vol. 42, no. 5

(135) Yan, Y. (2010). Tribology and tribo-corrosion testing and analysis of metallic biomaterials. *Metals for biomedical Devices* (pp. 178-201). Woodhead Publishing.

(136) <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17436> (Јул 2024)

(137) Kato, K. (2002). Classification of wear mechanisms/models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 216(6), 349-355.

(138) <https://matmatch.com/learn/property/tribology-friction-wear-lubrication> (Јул 2024)

- [139] https://www.stle.org/files/What_is_tribology/Tribology_Lubrication.aspx(Jyл 2024)
- [140] Stachowiak, G., Batchelor, A. W. (2004). *Experimental methods in tribology*. Elsevier
- [141] <https://en.wikipedia.org/wiki/Tribometer>(Jyл 2024)
- [142] <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-tribology/>(Jyл 2024)
- [143] Macovei, G., Paleu, V. (2022). A review on tribological behaviour of mechanical components obtained by additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1262, No. 1, p. 012010). IOP Publishing
- [144] Tyagi, R., Kumar, R., & Ranjan, N. (Eds.). (2024). *Tribological Aspects of Additive Manufacturing* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003400523>
- [145] Shah, R., Pai, N., Rosenkranz, A., Shirvani, K., Marian, M. (2022). Tribological behavior of additively manufactured metal components. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6), 138
- [146] Guenther, E., Kahlert, M., Vollmer, M., Niendorf, T., Greiner, C. (2021). Tribological performance of additively manufactured aisi h13 steel in different surface conditions. *Materials*, 14(4), 928
- [147] Çabuk, N., Çabuk, S. (2018). 3D Printers And Application Fields. In *International technological sciences and design symposium, Giresun/TURKEY* (pp. 349-356).
- [148] Chennakesava, P., Narayan, Y. S. (2014). Fused deposition modeling - insights. *Proceedings of the international conference on advances in design and manufacturing ICAD&M* (Vol. 14, p. 1345)
- [149] Kozior, T., Bochnia, J., Zmarzły, P., Gogolewski, D., Mathia, T. G. (2020). Waviness of freeform surface characterizations from austenitic stainless steel (316L) manufactured by 3D printing-selective laser melting (SLM) technology. *Materials*, 13(19), 4372
- [150] Stansbury, W.J., Idacavage, M.J. (2016). 3D Printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, Volume 32, pp. 54-64
- [151] Gokhare, V.G., Jijabai, J., Raut, D.N. (2017). A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT) Vol. 6 Issue 06
- [152] Đurović, S., Lazarević, D., Šarkoćević, Ž., Blagojević, M., Stojćetović, B., (2022). Fused Deposition Modeling in 3D Printing, *COAST conference*, Herceg Novi
- [153] Avinc, O., Yildirim, F., Yavas, A., Kalayci, E. (2017). 3D printing technology and its influences on the textile industry. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, Volume-5, Issue-7
- [154] Gao, G., Xu, F., Xu, J., Tang, G., Liu, Z. (2022). A survey of the influence of process parameters on mechanical properties of fused deposition modeling parts. *Micromachines*, 13(4), 553
- [155] Ahmad, N. N., Wong, Y. H., Ghazali, N. N. N. (2022). A systematic review of fused deposition modeling process parameters. *Soft Science*, 2(3), 11

- [156] <https://www.3dprintaj.com/fdm-fff-tehnologija-3d-printanja/>(Јул 2024)
- [157] <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/fdm-3d-printing/>(Април 2022)
- [158] <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>(Април 2024)
- [159] Izdebska-Podsiadły, J. (2016). Printing on Polymers: Theory and Practice *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*, pp. 1–20.
- [160] Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., Desobry, S. (2010). Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 9(5), 552-571.
- [161] (<https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>)(Април 2022)
- [162] <https://www.weerg.com/en/global/blog/the-ultimate-guide-to-choosing-the-best-material-for-fdm-3d-printing>(Јул 2024)
- [163] <https://themechninja.com/07/fdm-printing-advantages-disadvantages-detailed/>(Јул 2024)
- [164] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laminated-object-manufacturing-lom#WhenwasLaminatedObjectManufacturingCreated>(Јул 2024)
- [165] Müller, A., Karevska, S. (2016). How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain. *EY's Global 3D printing Report, 2016*.
- [166] Ntousia, M., Fudos, I. (2019). 3D printing technologies & applications: an overview. *Proceedings of the CAD 2020 Conference, Singapore*, Vol. 243, p. 248.
- [167] Yap, Y. L., Tan, Y. S. E., Tan, H. K. J., Peh, Z. K., Low, X. Y., Yeong, W. Y., Laude, A. (2017). 3D printed bio-models for medical applications. *Rapid prototyping journal*, 23(2), 227-235.
- [168] Asad, H., Ihsanullah, K. (2023). A Review of Laminated Object Manufacturing (LOM) Aspects and Various Processes used in It. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 10, 1.
- [169] Dermeik, B., Travitzky, N. (2020). Laminated object manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced engineering materials*, 22(9), 2000256.
- [170] Park, J., Kang, M. K., Hahn, H. T. (2001). Composite material based laminated object manufacturing (LOM) process Simulation. *Advanced Composites Letters*, 10(5), 096369350101000504
- [171] Gurr, M., Mülhaupt, R. (2011). Rapid Prototyping. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*
- [172] <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>(Јул 2024)
- [173] <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>(Јул 2024)
- [174] <https://theenterpriseworld.com/understand-laminated-object-manufacturing/>(Јул 2024)
- [175] Ratna, D. (2022) Recent advances and applications of thermoset resins.

- [176] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/selective-laser-sintering-sls/>(Jyл 2024)
- [177] Terekhina, S., Tarasova, T., Egorov, S., Guillaumat, L., Hattali, M. L. (2020). On the difference in material structure and fatigue properties of polyamide specimens produced by fused filament fabrication and selective laser sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 93-107.
- [178] Natarajan, J. (Ed.). (2021). *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Bentham Science Publishers.
- [179] Negi, S., Dhiman, S., Sharma, R. K. (2014). Basics and applications of rapid prototyping medical models. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 256-267.
- [180] <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/designing-for-selective-laser-sintering/>(Jyл 2024)
- [181] <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>(Jyл 2024)
- [182] <https://nexa3d.com/blog/sls-materials/>(Jyл 2024)
- [183] <https://asia.ark.com/applications-and-advantages-of-selective-laser-sintering/>(Jyл 2024)
- [184] https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/#google_vignette(Jyл 2024)
- [185] <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing/>(Jyл 2024)
- [186] Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. (2020). A review of stereolithography: Processes and systems. *Processes*, 8(9), 1138
- [187] Msallem, B., Sharma, N., Cao, S., Halbeisen, F. S., Zeilhofer, H. F., Thieringer, F. M. (2020). Evaluation of the dimensional accuracy of 3D-printed anatomical mandibular models using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ printing technology. *Journal of clinical medicine*, 9(3), 817.
- [188] <https://3faktor.com/en/3d-printing-materials-technologies/stereolithography-sla-technology-overview/#1481032374212-8f2613e9-984f> (Jyл 2024)
- [189] Corbel, S., Dufaud, O., & Roques-Carmes, T. (2011). Materials for stereolithography. *Stereolithography: Materials, processes and applications* (pp. 141-159). Boston, MA: Springer US.
- [190] Kim, H. C., Lee, S. H. (2005). Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization. *Computer-Aided Design*, 37(7), 711-725.
- [191] <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/stereolithography-sla/> (Jyл 2024)
- [192] Schmidleithner, C., Kalaskar, D. M. (2018). Stereolithography. *IntechOpen*.
- [193] <https://prototal.se/en-explore-popular-applications-of-sla-technology-for-additive-manufacturing/>(Jyл 2024)
- [194] <https://top3dshop.com/blog/selective-laser-melting-technology-benefits-applications-and-best-models>(Jyл 2024)

- [195] Gao, B., Zhao, H., Peng, L., Sun, Z. (2022). A review of research progress in selective laser melting (SLM). *Micromachines*, 14(1), 57.
- [196] Kruth, J. P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L., Van Humbeeck, J. (2010, April). Part and material properties in selective laser melting of metals. In *Proceedings of the 16th international symposium on electromachining* (Vol. 16, pp. 3-14). Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong Univ Press.
- [197] Jiao, L., Chua, Z. Y., Moon, S. K., Song, J., Bi, G., Zheng, H. (2018). Femtosecond laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts. *Nanomaterials*, 8(8), 601.
- [198] Kurzynowski, T., Chlebus, E., Kuźnicka, B., Reiner, J. (2012). Parameters in selective laser melting for processing metallic powders. In *High power laser materials processing: lasers, beam delivery, diagnostics, and applications* (Vol. 8239, pp. 317-322). SPIE.
- [199] <https://3dspro.com/resources/blog/selective-laser-melting-materials-guide>(Jyл 2024)
- [200] <https://encyclopedia.pub/entry/42895>(Jyл 2024)
- [201] Munir, K., Biesiekierski, A., Wen, C., Li, Y. (2020). Selective laser melting in biomedical manufacturing. *Metallic biomaterials processing and medical device manufacturing*, 235-269
- [202] <https://kbmadvanced.com/news/what-is-selective-laser-melting-slm/>(Jyл 2024)
- [203] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-aided design*, 69, 65-89.
- [204] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- [205] González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A., Sanz-Horta, R., Rodríguez-Hernandez, J. (2022). Additive Manufacturing of Polymers: 3D and 4D Printing, Methodologies, Type of Polymeric Materials, and Applications. *Macromolecular Engineering: From Precise Synthesis to Macroscopic Materials and Applications*, 1-65.
- [206] Hao, B., Lin, G. (2020). 3D printing technology and its application in industrial manufacturing. *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 782, No. 2, p. 022065). IOP Publishing
- [207] Mahmood, A., Akram, T., Chen, H., & Chen, S. (2022). On the evolution of additive manufacturing (3D/4D Printing) technologies: Materials, applications, and challenges. *Polymers*, 14(21), 4698.
- [208] <https://www.cmac.com.au/blog/top-10-materials-used-industrial-3d-printing>(Jyл 2024)
- [209] Vikas, K. „3D printers from dimension to technology “VIII SEMESTER B. Tech Students, Department of Mechanical Engineering Dronacharya College of Engineering, Gurugram, India.
- [210] Rahman, M. H., Bhoi, P. R. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of cleaner production*, 294, 126218.

- [211] Saini, P., Arora, M., Kumar, M. R. (2016). Poly (lactic acid) blends in biomedical applications. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 47-59.
- [212] Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M., Desobry, S. (2010). Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 9(5), 552-571.
- [213] Hu, Y., Daoud, W. A., Cheuk, K. K. L., Lin, C. S. K. (2016). Newly developed techniques on polycondensation, ring-opening polymerization and polymer modification: Focus on poly (lactic acid). *Materials*, 9(3), 133.
- [214] de França, J. O. C., da Silva Valadares, D., Paiva, M. F., Dias, S. C. L., Dias, J. A. (2022). Polymers based on PLA from synthesis using D, L-lactic acid (or racemic lactide) and some biomedical applications: a short review. *Polymers*, 14(12), 2317.
- [215] Ehrenstein, G. W., Riedel, G., Trawiel, P. (2012). Thermal analysis of plastics: theory and practice. *Carl Hanser Verlag GmbH Co KG*.
- [216] Hung, K. C., Chen, Y. L., Wu, J. H. (2012). Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, 97(9), 1680-1685.
- [217] Khalid, M. Y., Imran, R., Arif, Z. U., Akram, N., Arshad, H., Al Rashid, A., García Márquez, F. P. (2021). Developments in chemical treatments, manufacturing techniques and potential applications of natural-fibers-based biodegradable composites. *Coatings*, 11(3), 293
- [218] Sandanamsamy, L., Harun, W. S. W., Ishak, I., Romlay, F. R. M., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Tsumori, F. (2023). A comprehensive review on fused deposition modelling of polylactic acid. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(5), 775-799.
- [219] Li, T., Aspler, J., Kingsland, A., Cormier, L. M., Zou, X. (2016). 3d printing—a review of technologies, markets, and opportunities for the forest industry. *J. Sci. Technol. For. Prod. Process*, 5(2), 30.
- [220] Jadhav, K. G. (2012). Synthesis of monomers for new conjugated polymers.
- [221] Arnold, J. R. (2004). High quality copper-nickel-chromium plating on plastics: a continuous process and its challenges. *Plating and surface finishing*, 91(1), 38-47.
- [222] Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K., Vivek, C. S. (2016). Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of materials science*, 51, 3657-3674.
- [223] Lifton, V., Lifton, G., Simon, S. (2014). Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology. *Rapid Prototyping Journal*, 20(5), 403-412.
- [224] Guessasma, S., Belhabib, S., Nouri, H. (2019). Printability and tensile performance of 3D printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling. *Polymers*, 11(7), 1220.
- [225] Dupaix, R. B., Boyce, M. C. (2005). Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate)(PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer*, 46(13), 4827-4838.

- [226] Shi, Q., Xiao, R., Yang, H., Lei, D. (2020). Effects of physical aging on thermomechanical behaviors of poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(8), 835-846.
- [227] (https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PETG_01.pdf) (Jyл 2024)
- [228] Jia, Y., He, H., Peng, X., Meng, S., Chen, J., Geng, Y. (2017). Preparation of a new filament based on polyamide-6 for three-dimensional printing. *Polymer Engineering & Science*, 57(12), 1322-1328.
- [229] Harris, M., Potgieter, J., Ray, S., Archer, R., Arif, K. M. (2019). Acrylonitrile butadiene styrene and polypropylene blend with enhanced thermal and mechanical properties for fused filament fabrication. *Materials*, 12(24), 4167.
- [230] Sood, A. K., Ohdar, R. K., Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31(1), 287-295.
- [231] <http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polyamides.aspx> (Jyл 2024)
- [232] <http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyamide%20type.html> (Jyл 2024)
- [233] Wakeman, M. D., Reynolds, T., Shaffer, M. (2019). Polypropylene for 3D Printing: Properties, Processing, and Applications. *Journal of Materials Science*, 54(12), 8547-8561.
- [234] Zander, N. E., Gillan, M., Burckhard, Z., Gardea, F. (2019). Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. *Additive Manufacturing*, 25, 122-130.
- [235] Li, H., Yang, Y., & Zhao, Y. (2020). Comprehensive Study on 3D Printing of Polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(27), 48734.
- [236] Turner, B. N., Strong, R., Gold, S. A. (2021). A review of melt extrusion additive manufacturing processes. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 27(1), 19-38.
- [237] Singh, R., Yadav, S., Bajpai, V. (2021). Polycarbonate-Based Materials: Properties, Processing, and Applications. *Materials Today: Proceedings*, 45, 563-570.
- [238] Dai, Y., Liu, L., Li, Z. (2019). Advances in 3D Printing of Polycarbonate: A Review. *Materials & Design*, 183, 108142.
- [239] Park, J., Song, D., Kim, H. (2020). Additive Manufacturing of Polycarbonate: A Comprehensive Review. *Materials Science and Engineering: A*, 792, 139800.
- [240] Luo, Y., Ma, S., Sun, J. (2020). Recent Developments in Polycarbonate-Based Composites for Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 202, 108393.
- [241] Das, S., Bourell, D. L., & Babu, S. S. (2016). Metallic materials for 3D printing. *Mrs Bulletin*, 41(10), 729-741.
- [242] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/metal-3d-printing-materials/> (Jyл 2024)
- [243] <https://markforged.com/resources/blog/metal-3d-printing-materials> (Jyл 2024)
- [244] <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/?filas=abs,pla,petg,nylon,polycarbonate,polypropylene,metal-filled> (Jyл 2024)

- [245] Tomal, A. A., Saleh, T., Khan, M. R. (2017). Improvement of dimensional accuracy of 3-D printed parts using an additive/subtractive based hybrid prototyping approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 260, No. 1, p. 012031). IOP Publishing
- [246] Zhou, H., Cheng, X., Jiang, X., Zheng, G., Zhang, J., Li, Y., Lv, F. (2022). Green Manufacturing-Oriented Polyetheretherketone Additive Manufacturing and Dry Milling Post-Processing Process Research. *Processes*, 10(12), 2561
- [247] <https://all3dp.com/1/3d-printing-cnc-guide-to-hybrid-additive-subtractive-manufacturing/>(Jyл 2024)
- [248] <https://www.curbellplastics.com/services-capabilities/fabrication-machined-parts/plastic-machining-guidelines/plastic-milling-machining-guidelines/>(Jyл 2024)
- [249] <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/cnc-machining-3d-printed-parts/> last accessed 2023/05/29(Jyл 2024)
- [250] Pérez, M., García-Collado, A., Carou, D., Medina-Sánchez, G., Dorado-Vicente, R. (2021). On surface quality of engineered parts manufactured by additive manufacturing and postfinishing by machining. *Additive Manufacturing* (pp. 369-394). Elsevier
- [251] <https://wagner-machine.com/blog/combining-3d-metal-printing-and-finish-machining-for-superior-quality-parts/>(Jyл 2024)
- [252] <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/post-processing-for-metal-3d-printing/>(Jyл 2024)
- [253] <https://facfox.com/docs/kb/balancing-cnc-machining-and-3d-printing-for-metal-parts>(Jyл 2024)
- [254] <https://www.designnews.com/3dp/3-reasons-why-you-should-combine-3d-printing-and-cnc-machining>(Jyл 2024)
- [255] <https://amfg.ai/2018/07/10/hybrid-technology-the-future-of-manufacturing/>(Jyл 2024)
- [256] Jones, J. B. (2014). The synergies of hybridizing CNC and additive manufacturing. *Hybrid Manufacturing Technologies Ltd.*
- [257] <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/cnc-machining-3d-printing/>(Jyл 2024)
- [258] Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A. E., Neugebauer, R., Mcintosh, D. (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP annals*, 63(2), 561-583.
- [259] Grzesik, W. (2017). Advanced machining processes of metallic materials, *Elsevier*, Amsterdam
- [260] Zhu, Z., Dhokia, V. G., Nassehi, A., Newman, S. T. (2013). A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(7), 596–615.
- [261] Grzesik, W. (2018). Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review. *Journal of Machine Engineering*, 18(4), 5-24.
- [262] Rastvorova, I. I., Klyucherev, N. A. (2021). Design and modelling of a universal CNC machine. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1753, No. 1, p. 012040). IOP Publishing

- [263] Lee, W. C., Wei, C. C., & Chung, S. C. (2014). Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2366-2374.
- [264] <https://meltio3d.com/3d-printing-cnc/>(Jyл 2024)
- [265] <https://www.phillipscorp.com/the-future-trends-in-the-hybrid-am-industry/>(Jyл 2024)
- [266] <https://www.iso.org/artificial-intelligence/what-is-ai/>(Jyл 2024)
- [267] <https://www.coursera.org/articles/how-does-ai-work/>(Jyл 2024)
- [268] Luger, G. F. (1998). *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, 5/e. Pearson Education India.
- [269] Dounis, A. I. (2010). Artificial intelligence for energy conservation in buildings. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 267-299.
- [270] <https://www.geeksforgeeks.org/activation-functions-neural-networks/>(Jyл 2024)
- [271] Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). Deep feedforward networks, deep learning (1)
- [272] Nwankpa, C., Ijomah, W., Gachagan, A., Marshall, S. (2018). Activation functions: Comparison of trends in practice and research for deep learning. *arXiv preprint arXiv:1811.03378*.
- [273] <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/03/activation-functions-and-its-types-which-is-better/>(Jyл 2024)
- [274] <https://appinventiv.com/blog/ai-in-manufacturing/>(Jyл 2024)
- [275] Talaat, F. M., Hassan, E. (2021). Artificial intelligence in 3D printing. *Enabling Machine Learning Applications in Data Science: Proceedings of Arab Conference for Emerging Technologies 2020* (pp. 77-88). Springer Singapore
- [276] <https://www.designtechproducts.com/articles/ai-3d-printing/>(Jyл 2024)
- [277] Goh, G. D., Sing, S. L., Yeong, W. Y. (2021). A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 54(1), 63-94.
- [278] Keller, A. Z., Kamath, A. R. R., Perera, U. D. (1982). Reliability analysis of CNC machine tools. *Reliability engineering*, 3(6), 449-473
- [279] Moreira, L. C., Li, W. D., Lu, X., Fitzpatrick, M. E. (2019). Supervision controller for real-time surface quality assurance in CNC machining using artificial intelligence. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 158-168.
- [280] Kim, D. H., Kim, T. J., Wang, X., Kim, M., Quan, Y. J., Oh, J. W., Ahn, S. H. (2018). Smart machining process using machine learning: A review and perspective on machining industry. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 555-568.

[281] Çınar, Z. M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., Safaei, B. (2020). Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0. *Sustainability*, 12(19), 8211

[282] <https://at-machining.com/artificial-intelligence-in-cnc-machining/> (Jyл 2024)

[283] Moreira, L. C., Li, W. D., Lu, X., Fitzpatrick, M. E. (2019). Supervision controller for real-time surface quality assurance in CNC machining using artificial intelligence. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 158-168.

[284] <https://www.americanmicroinc.com/resources/impact-ai-cnc-machining/#impact> (Jyл 2024)

[285] <https://www.china-machining.com/blog/ai-for-cnc-machining/> (Jyл 2024)

[286] <https://www.manualslib.com/manual/1816996/Gom-Atos-Ii-Triple-Scan.html> (октобар 2024)

СПИСАК СЛИКА

1. Слика 6.1. Хијерархија ISO ГСП стандарда [79]
2. Слика 6.2. Параметри храпавости површине
3. Слика 6.3. Остали параметри храпавости
4. Слика 6.4. Принцип рада координатне мерне машине [84]
5. Слика 6.5. Мосни тип координатне мерне машине [88]
6. Слика 6.6. Портални тип координатне мерне машине [90]
7. Слика 6.7. Конзолни тип координатне мерне машине [93]
8. Слика 6.8. Координатна мерна машина са хоризонталном руком [97]
9. Слика 6.9. Метода триангулације [102]
10. Слика 6.10. Скенер са структурираним светлом [104]
11. Слика 6.11. Принцип рада фотограметрије [107]
12. Слика 6.12. Ласерски пулсни (Time of Flight) скенери [109]
13. Слика 6.13 Принцип рада СТ скенера [112]
14. Слика 6.14. Принцип рада профилометра [117]
15. Слика 6.15 Принцип рада AFM-а [121]
16. Слика 6.16. Принцип рада интерферометра [125]
17. Слика 6.17. Одређивање грешке линеарне величине [133]
18. Слика 6.18. Грешка облика – равности [133]
19. Слика 6.19. Извештај мерења грешке равности
20. Слика 6.20 Грешка положаја - цилиндричности [133]
21. Слика 6.21. Грешка паралелности и зона толеранције [131]
22. Слика 6.22 Грешка положаја - управности [131]
23. Слика 6.23 Грешка положаја - угловности [131]
24. Слика 6.24 Грешка места - локације осе [131]
25. Слика 6.25 Грешка тачности обртања [131]
26. Сл 6.26. Најчешће коришћени типови контакта при мерењу [142]
27. Слика 7.1 Принцип рада FDM 3D штампача [153]
28. Слика 7.2 Процесни параметри FDM технологије [155]
29. Слика 7.3. Основна шема LOM процеса, којој се могу додати додатни кораци обраде. Непрекидни ток материјала је означен црвеним стрелицама [169].
30. Слика 7.4 Шематски приказ SLS технологије [179]
31. Слика 7.5 Процес стереолитографије [185]
32. Слика 7.6 Дијаграм SLM процеса [197]

33. Слика 8.1. CNC обрада 3D штампаног полимера [247]
34. Слика 8.2.3D штампани метални деопре и после CNC обраде [253]
35. Слика 9.1. Концепт хибридног производног процеса [256]
36. Слика 9.2. Хибридна CNC-FDM машина [263]
37. Слика 10.1 Шематски приказ класификације вештачке интелигенције [269]
38. Слика 10.2 Вештачка интелигенција и 3D штампа [278]
39. Слика 10.3 CNC машинска обрада кроз систем за надзор базиран на вештачкој интелигенцији [284]
40. Слика 11.1 Узорак у SolidWorks софтверу (а) и према ASTM D638 стандарду (б)
41. Слика 11.2 Узорци са углом испуне 0° - 45° у односу на радну површину
42. Слика 11.3 Централни део узорка са 3 (а), 5(б) и 7(в) слојева у зиду
43. Слика 11.4 3D штампач (а) и узорци након поступка штампе (б)
44. Слика 11.5 Tessa Micro Hite 4-5-4 координатна мерна машина
45. Слика 11.6 План мерења и процес поступка мерења епрувета
46. Слика 11.7 Одступање паралелности PARL1
47. Слика 11.8 Одступање паралелности PARL2
48. Слика 11.9 Одступање угловности ANGL1
49. Слика 11.10 Одступање угловности ANGL2
50. Слика 11.11 Одступање угловности ANGL3
51. Слика 11.12 Серво-хидраулична машина за испитивање затезне чврстоће Shimadzu тип EHF EV101K3-070-0A – а и процес кидања – б
52. Слика 11.13 дијаграм затезни напон-угао испуне за PLA материјал са 3, 5, 7 слојева у зиду
53. Слика 11.14 дијаграм затезни напон-угао испуне за PETG материјал са 5 и 7 слојева у зиду
54. Слика 11.15 дијаграм затезни напон-угао испуне за ABS материјал са 5 и 7 слојева у зиду
55. Слика 11.16 Дијаграм сила-издужење PLA са 3 слоја у зиду
56. Слика 11.17 Дијаграм сила-издужење за узорке са 5 слојева у зиду
57. Слика 11.18 Дијаграм сила-издужење за узорке са 7 слојева у зиду
58. Слика 11.18 Просечна затезна чврстоћа за све узорке
59. Слика 11.20 Узорци након кидања
60. Слика 11.21 PLA узорци са 7 слојева у зиду након испитивања затезне чврстоће (а), 3 слоја у зиду (б), и 5 слојева у зиду (в)
61. Слика 11.22 Узорак у Ultimaker Cura софтверу
62. Слика 11.23 Уређај за мерење храпавости Talysurf-6

63. Слика 11.24 Ширина хабања са различитим оптерећењем
64. Слика 11.25 Коefицијент трења за различите врсте обраде
65. Слика 11.26 Коefицијент трења са различитим оптерећењем
66. Слика 11.27 Структура ANN
67. Слика 11.28 Активационе функције: (а) ReLU активациона функција; (б) tanh активациона функција.
68. Слика 11.29 Радни комад: (а) CAD софтвер; (б) Ultimaker Cura софтвер.
69. Слика 11.30 HAAS VF-3SS глодалица
70. Слика 11.31 Вретенасто глодало VHM 6
71. Слика 11.32 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 5-S-R моделом.
72. Слика 11.33 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 10-S-R моделом.
73. Слика 11.34 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 5-S-T моделом.
74. Слика 11.35 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra са 5x2-S-R моделом.
75. Слика 11.36 Поређење предвиђених и измерених резултата Ra за RA-2 и RA-3 MRA моделе.
76. Слика 11.37. Вредности тачности (R^2) ANN и MRA модела.
77. Слика 11.38 Мере радног комада (а) и CAD модел радног комада (б)
78. Слика 11.39 STL модел (а) и одштампан радни комад (б)
79. Слика 11.40 План мерења по мерној равни и тачкама мерених површина
80. Слика 11.41 План мерења по мерној равни у софтверу мерне машине TESA-REFLEX Recorder application software (а) и план мерења тачака мерених површина (б)
81. Слика 11.42 Поступак мерења површина изданака ABS (а) и PLA материјала (б)
82. Слика 11.43 План резања и поступак резања изданака
83. Слика 11.44 План мерења по мерној равни (а) и тачкама мерених површина након резања (б)
84. Слика 11.45 Поређења одступања дужина страница X и Y изданака штампаних делова
85. Слика 11.46 Поређења одступања дужина страница X и Y изданака обрађених делова
86. Слика 11.47 Поређења одступања од управности штампаних делова и обрађених делова
87. Слика 11.48 Поређења одступања од паралелности штампаних делова и обрађених делова
88. Слика 11.49 Поређења одступања од равности штампаних делова и обрађених делова
89. Слика 11.50 Површинска храпавост пре и након обраде
90. Слика 11.51 ATOS II 3D скенер [286]
91. Слика 11.52 Облак тачака скенираног дела и поступак избора апроксимације површине
92. Слика 11.53 Апроксимација скенираних површина и избор толеранција облика и положаја

93. Слика 11.54 Добијена одступања и извештај мерења добијен у GOM Inspect V8 софтверу
94. Слика 11.55 Одступања управности ABS измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
95. Слика 11.56 Одступања управности PETG измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
96. Слика 11.57 Одступања управности PLA измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
97. Слика 11.58 Одступања паралелности ABS измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
98. Слика 11.59 Одступања паралелности PETG измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
99. Слика 11.60 Одступања паралелности PLA измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
100. Слика 11.61 Одступања равности ABS измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
101. Слика 11.62 Одступања равности PETG измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)
102. Слика 11.63 Одступања равности PLA измерена 3D скенером (а) и СММ-ом (б)

СПИСАК ТАБЕЛА

1. Табела 6.1 Символи GD&T - ISO 1101
2. Табела 7.1 Предности и недостаци FDM штампе
3. Табела 7.2 Предности и недостаци LOM технологије [173]
4. Табела 7.3. Предности и недостаци SLS технологије [183]
5. Табела 7.4. Механичке особине неких од најчешће коришћених материјала [244]
6. Табела 8.1: Површинска храпавост измерена у адитивно произведеним и накнадно обрађеним полимерним комадима [250].
7. Табела 9.1. Предности и недостаци 3D штампе и CNC обраде
8. Табела 10.1 Активационе функције
9. Табела 11.1 Параметри штампе
10. Табела 11.2 Вредности одступања од паралелности - PARL1
11. Табела 11.3 Вредности одступања од паралелности - PARL2
12. Табела 11.4. Вредности одступања од угловности - ANGL1
13. Табела 11.5 Вредности одступања од угловности - ANGL2
14. Табела 11.6. Вредности одступања од угловности - ANGL3
15. Табела 11.7 Тип обраде и измерене вредности
16. Табела 11.8 Узорци хабања, mm
17. Табела 11.9 Узорци хабања, $v=0.75\text{m/s}$
18. Табела 11.10 Коефицијент трења у зависности од оптерећења и врсте обраде
19. Табела 11.11 Експериментални подаци за конструкцију модела
20. Табела 11.12 Параметри учења
21. Табела 11.13 Добијени резултати површинске храпавости Ra [μm].
22. Табела 11.14 Параметри обраде глодањем
23. Табела 11.15 Вредности одступања дужина и одступања од облика и положаја након 3D штампе
24. Табела 11.16 Вредности одступања дужина и одступања од облика и положаја након резања
25. Табела 11.17 Површинска храпавост пре и након обраде
26. Табела 11.18 Вредности одступања дужина и одступања од облика и положаја након резања измерена помоћу 3D скенера