

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Савремени обрадни системи

Број индекса: 375/2017

Никола Р. Кочовић

**Савремени обрадни системи за
3Д штампу
Мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Проф. др Богдан Недић - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО
Предмет: Савремени обрадни системи

МАСТЕР РАД

са темом:

САВРЕМЕНИ ОБРАДНИ СИСТЕМИ ЗА 3Д ШТАМПУ

За кандидата: Кочовић Никола, број индекса 375/2017

У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о технологијама производње делова помоћу 3Д штампе. Потребно је посебно описати технологије 3Д штампе, опрему и примере делова. У посебном делу рада извршити прикупљање и систематизацију података о триболошким карактеристикама материјала за израду делова 3Д штампом и извршити одговарајућа испитивања.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Технологије израде делова 3Д штампом,
3. Материјали за израду делова 3Д штампом,
4. Савремени обрадни системи за 3Д штамп,
5. Испитивање триболошких карактеристика материјала,
6. Закључци,
7. Литература.

ДАТУМ
22.09.2020.

ПРЕДМЕТНИ НАСТАВНИК
Проф. др Богдан Недић

Резиме

Предмет овог рада је прикупљање и систематизација података о технологијама производње делова помоћу 3Д штампе. Описане су технологије 3Д штампе, као и материјали и опрема која се користи за израду делова. У посебном делу рада су извршена лабораторијска испитивања као и прикупљање и систематизација података о триболошким карактеристикама материјала за израду делова 3Д штампом.

Кључне речи: 3Д штампа, технологије 3Д штампе, материјали за 3Д штампу, триболошке карактеристике материјала

Abstract

The subject of this paper is the collection and systematization of data on parts production technologies using 3D printing. 3D printing technologies are described, as well as materials and equipment used to make the parts. In a special part of the paper, laboratory test were performed, as well as the collection and systematization of data on the tribological characteristics of materials for the parts production by 3D printing.

Keywords: 3D printing, 3D printing technologies, materials for 3D printing, tribological characteristics of materials

Садржај:

1. Увод	1
2. Технологије израде делова 3Д штампом	3
2.1 Моделирање депоновањем истопљеног материјала (FDM)	3
2.2 Стереолитографија (SLA)	4
2.3 Селективно ласерско синтеровање (SLS)	6
2.4 Производња објеката ламинацијом (LOM)	8
2.5 Ink - Jet штампање.....	10
3. Материјали за израду делова 3Д штампом.....	12
3.1 Материјали који се користе код FDM поступка	12
3.2 Материјали који се користе код стереолитографије (SLA)	13
3.3 Материјали који се користе код селективног ласерског синтеровања (SLS)	14
3.4 Материјали који се користе код производње објеката ламинацијом (LOM)	15
3.5 Материјали који се користе код Ink - Jet штампања.....	16
4. Савремени обрадни системи за 3Д штампу	18
4.1 Производни (индустријски) 3Д штампачи који користе SLS технологију	19
4.2 Производни (индустријски) 3Д штампачи који користе SLA технологију	25
5. Испитивање триболошких карактеристика материјала	32
5.1 Резултати испитивања	37
6. Закључак	48
7. Литература	50

1. Увод

3Д штампање је производна технологија за коју је специфично да се предмет израђује додавањем материјала слој по слој. Осим уштеде материјала у односу на класичне технологије обраде (глодање и сл.), код којих се одузима вишак материјала, технологија 3Д штампе омогућује стварање предмета директно из рачунарског 3Д модела. Постоји низ алата за 3Д моделовање којима је могуће израдити жељени предмет и материјализовати га на 3Д штампачу.

Главна предност 3Д штампања је његова брзина и једноставност, али и могућност израде предмета од комбинације различитих материјала, без потребе за спајањем. Целокупан процес започиње се виртуелним дизајнирањем објекта који треба да се одштампа. Виртуелно дизајнирање се врши у CAD (енг. Computer - Aided Design) датотеци применом 3Д програма за моделовање (за стварање тотално новог објекта) или употребом 3Д скенера (за копирање постојећег објекта). 3Д скенер врши тродимензионално копирање објекта. Ови скенери користе различите технологије за генерисање жељеног модела. Да би се припремио објекат за штампање 3Д софтвер виртуелно сече коначан модел у велики број хоризонталних слојева. Софтверски задат објекат креира се сукцесивним наношењем слојева материјала док се не добије коначан облик [1].

Типична дебљина слоја је 0.1 mm, иако се у зависности од технологије може креирати од неколико микрона до неколико центиметара. Први слој се наноси на подлогу радног стола, затим се радни сто спушта (или глава писача подиже) за висину слоја, наноси се следећи слој и поступак се понавља све док се не одштампа цео предмет.

Време штампања зависи од предмета и технологије. За мање предмете (нпр. коцка странице 1 cm) процес израде ће трајати неколико минута, док се код већих предмета време мери у сатима. Овим поступцима могућа је израда производа компликоване геометрије у кратком времену, дизајнирањем помоћу рачунара, односно на темељу CAD рачунарског модела [2].

Амерички проналазач Chuck Hill је 1986. године одштампао први тродимензионални предмет. У питању је била пластична шоља направљена технологијом стереолитографије (стврдњавање пластичне смоле под дејством светлости). Три године касније Hill је патентирао ову технологију и основао компанију 3D Systems. Данас је она једна од водећих компанија на свету у пољу 3Д штампања. У овој компанији развијен је први формат за 3Д штампање - STL (од термина стереолитографија).

Средином осамдесетих година прошлог века на Унивезритету Конрел под покровитељством америчке агенције за истраживање напредних војних пројеката (DARPA, Defence Advanced Research Project Agency), настала је техника синтеровања (спајање праха у чврсте објекте). Код ове технике може да се користи широк спектар материјала у праху, од метала преко пластике и керамике. Само спајање праха врши се под дејством енергетског зрака, најчешће ласера, али могу да се користе и електронски

снопови као и фокусирани топлотни извори. Професори који су осмислили и патентирали ову технику основали су компанију "DTM".

Крајем осамдесетих година Scott Crump је поставио основе за моделирање спајањем наношених слојева FDM (Fused Deposition Modeling). Crump је патентирао ову технику и основао компанију Stratasys. Ово је једна од најзаслужнијих техника за експанзију 3Д штампања у свету.

Године 2011. највећи конкурент "DTM-a", "3D Systems", купио је компанију заједно са свим њеним патентима. И поред свих очигледних предности ови штампачи су и даље били намењени само компанијама и дуго времена нико није замишљао да би људи уз свој кућни рачунар желели да имају и 3Д штампач, све до 2005.

Инспирисани развојем рачунара "Altair 8800", студенти са Универзитета Корнел покренули су пројекат "Fab@Home", чији је циљ био дизајн "open source" система за 3Д штампање, који би људи могли сами да направе код куће. Као резултати овог пројекта појавили су се планови за израду два различита модела. Исте године када је и "Fab@Home", започео је и пројекат RepRap са још амбициознијим циљем - да се направи 3Д штампач који је у стању да сам себи прави компоненте и резервне делове. Уређаји из оба пројекта користе технику FDM (преименовану из правних разлога у FFF - Fuseed Fillament Fabrication).

Термопластика се загрева кроз специјалну млазницу и наноси на подлогу слој по слој док предмет не буде завршен. Fab@Home и RepRap и данас постоје. Њихова искуства се могу искористити и за сопствено састављање 3Д штампача. Ипак наслеђе ових пројеката је прешло у комерцијални домен. По истеку важности првих патента за FDM технологију 2009. године основана је компанија MakerBot, чији су штампачи намењени онима који код куће желе да се баве моделима и техником. MakerBot-ови уређаји продају се као комплети које корисници сами склапају у готов штампач, самим тим су јефтинији и приступачнији ширем кругу људи [3].

2. Технологије израде делова 3Д штампом

По техници 3Д штампања можемо разликовати технологије:

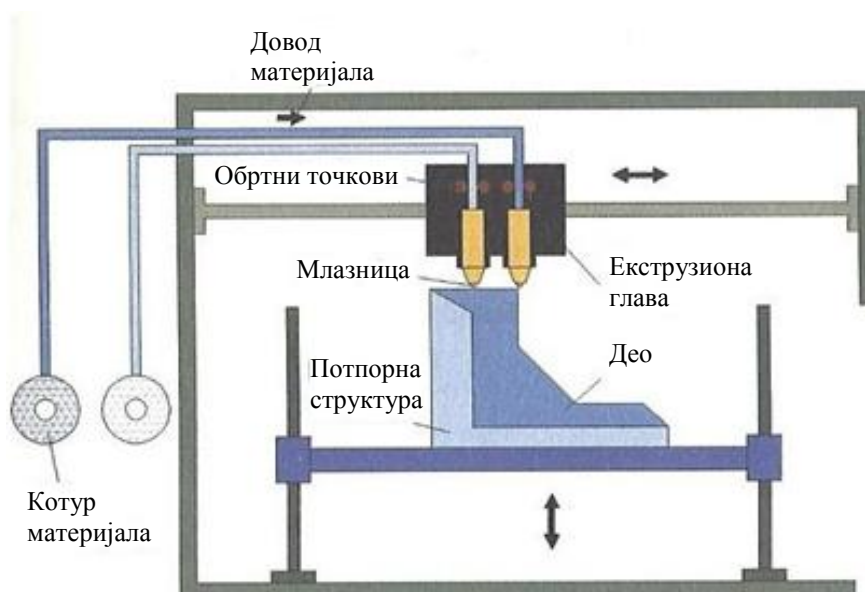
1. Моделирање депоновањем истопљеног материјала (FDM)
2. Стереолитографија (SLA)
3. Селективно ласерско синтеровање (SLS)
4. Производња објеката ламинацијом (LOM)
5. Ink - Jet штампање

2.1 Моделирање депоновањем истопљеног материјала (FDM)

Принцип FDM технологије: Материјал у облику жице се доводи са намотаја до специјално дизајниране главе, која га топи и екструдира на радну површину. Након екструдирања, материјал се хлади и очврсне, и тако формира модел, дуж путање главе, у једном слоју. Као и код других RP (Rapid Prototyping) технологија, модел се израђује из низа слојева. Параметри који утичу на перформансе и функционалност система су модел еластичности материјала, вискозитет материјала, тачност позиционирања, брзина депоновања, ширина пута, запремински проток, пречник отвора главе, температура загревања и геометрија дела.

Поступак FDM технологије: У овом патентираном процесу, геометријски модел се креира у CAD софтверу који даје IGES или STL формат фајлова. Затим се преноси на радну станицу где се процесира у специјалном софтверу. Овај софтвер поседује могућности аутоматског генерисања ослонаца, врши оријентацију модела у оптималну позицију за израду, и дели на модел на хоризонталне слојеве. Дебљина слојева може бити од 0.172 до 0.356 mm, зависно од намене модела. На крају се генеришу путање главе за процес израде и оне се шаљу на FDM машину.

Материјал за израду је у намотајима, и уводи се у главу за екструдирање, где се загрева до температуре топљења. Онда се материјал екструдира кроз главу и депонује у виду слоја на претходно очврснути материјал. С обзиром да се атмосфера у комори за израду држи испод температуре топљења, депоновани материјал врло брзо очврсне. Покретањем у X-Y равни по генерисаној путањи глава формира један слој. Када је он израђен, глава се подиже за дебљину слоја и израђује следећи. Ширина екструдираниог материјала у хоризонталној равни варира од 0.24 до 0.965 mm. Овај параметар, назван "ширина пута", може бити променљив у различитим слојевима. Употребом два отвора на глави остварује се депоновање два материјала за израду. Основни материјал је намењен за израду предмета, док је секундарни намењен за израду ослонаца. Секундарни материјал се везује за основни, и скида се након израде предмета. Слика 2.1 приказује овај поступак [5].



Слика 2.1 Поступак израде FDM технологијом [4]

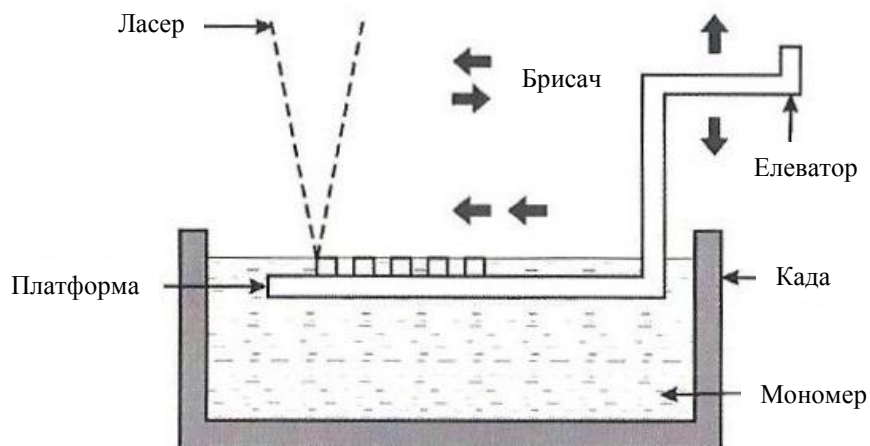
2.2 Стереолитографија (SLA)

Принцип рада стереолитографије: Скоро сви RP системи користе принцип слојевите израде. Овде је извор енергије за фотополимеризацију ласерски зрак који скенира површину течног мономера.

Важан део система су ласер и оптички систем за скенирање. Снага SLA технологије лежи у способности да брзо усмерава фокусирану радијацију одговарајуће снаге и таласне дужине на површину течног мономера у складу са компјутерски генерисаним подацима о попречним пресецима дела. Код SLA поступка, ласерски зрак одређене снаге и таласне дужине се пропушта кроз телескоп за ширење зрака на пар галванометарски управљаних огледала. Она формирају оптички систем за скенирање код SLA система. Зрак се фокусира на површини течног мономера, очвршћавајући течност до предефинисане дубине.

Да би се одржала прецизност - конзистентност у току израде дела, дубина очвршћавања и ширина очврснуте линије се морају контролисати. Параметри који утичу на перформансе и функционалност делова су физичка и хемијска својства мономера, брзина и резолуција оптичког система за скенирање, снага, таласна дужина и тип ласера који се користи, величина тачке ласера, систем за пресвлачење и процес накнадног очвршћавања [4].

Поступак израде стереолитографије: Стереолитографија је процес стварања 3Д пластичних објеката директно из CAD података. Слика 2.2 илуструје основни поступак.



Слика 2.2 Шема SLA поступка [5]

На почетку је када уређаја испуњена са фотоочвршћавајућим мономером, а покретна платформа се налази тик испод површине течности.

Оператор учитава фајл CAD модела у систем. Затим генерише ослонце који стабилизују део у току израде. Транслатор аутоматски конвертује податке у фајл. Контролна јединица исеца модел и ослонце у низ попречних пресека дебљине 0.025 до 0.5 mm. Компјутерски управљан систем за скенирање усмерава и фокусира ласерски зрак, тако да се очвршћава само дводимензионални попречни пресек који одговара слоју на површини течности до дубине веће од дебљине једног слоја. Платформа се затим спушта за дебљину слоја да би флуид прекрио очврснули полимер. Брисач, или вакуумска оштрица, прелази преко површине да би пресвукао нови слој полимера преко површине. Ласер затим исцртава попречни пресек. Овај проц се понавља израдом дела одоздо на горе, све до завршетка. Део се затим издиже изнад када и чисти од сувишног полимера. Слика 2.3 приказује поступак израде дела, и коначан изглед дела са структуром ослонаца [5].



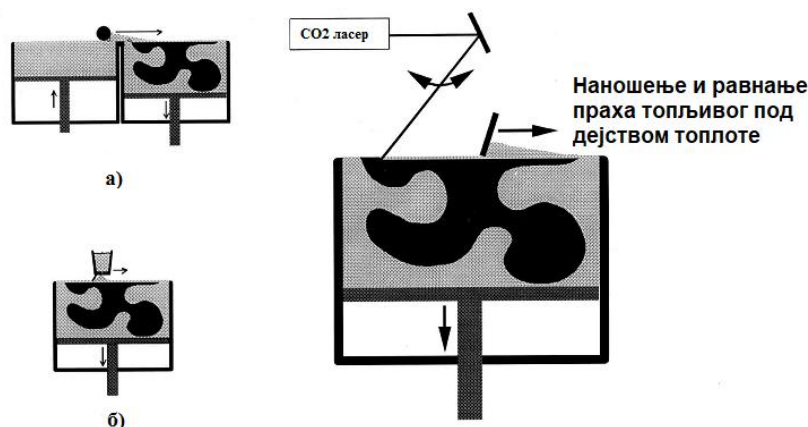
Слика 2.3 Поступак израде дела SLA методом и коначан изглед дела [5]

2.3 Селективно ласерско синтеровање (SLS)

Најбитније карактеристике технике поступка су:

- Највише примењивана, SLS технологија је патентирана 1989. године од стране Тексашког Универзитета, Ostin, а затим комерцијализована од стране DTM Корпорације (SAD) и EOS, Inc. (Немачка). Ови системи су, такође, развили и имају на тржишту своје сопствене машине за SLS;
- Користи се знатно већа енергија него код SLA технологије; могућа је израда структурних, односно функционалних делова;
- Ласерски снап врши селективну фузију прашкастог материјала: синтетичког праха, еластомера, и у новије време, све више, металног праха;
- Предности над SLA технологијом су у могућности примене разноврсних материјала и приближавања коришћењу уобичајених пластичних материјала који се користе у практичној примени;
- Зависно од корака слојева, тачност дуж вертикалне осе може бити различита;
- Поступак је једноставан;
- Постоји могућност израде са материјалима сличним термопластима (поликарбонати, синтетика или синтетика пуњена стакленим влакнима);
- Овим поступком се добија ситнозрнаста порозна површина, осим у случају када се обложи одређеним материјалом, чијом применом, такође, ојачава део;
- Неочврсли материјал се једноставно одстрањује по изради четкањем или одувавањем.

У овим техникама (Слика 2.4), слој прашкастог материјала је раширен и поравнан преко горње површине структуре која се израђује. CO₂ ласерском зраку се, тада, селективно излаже слој при чему се врши фузија оних површина дефинисаних геометријом попречног слоја. Честице праха се спајају различитим механизмима фузије, укључујући топљење, површинско везивање, синтеровање, као и њихово облагање полимерима. Материјал који није био изложен ласерском зраку (фузији) остаје на месту као потпорни материјал. После наношења сваког слоја, покретна платформа спушта део за дебљину слоја, и следећи слој праха се наноси. Када се део комплетно изради, он је струкутурно одвојен од прашкастог потпорног материјала. Неколико врста материјала су у употреби: пластични материјали, воскови и металне легуре са ниском температуром топљења, као и метали обложени полимером и керамика за израду преоблика. Директна фузија метала и керамике (као необложивих прахова) још увек се испитује. На том пољу, Fraunhofer Институт за Производну технологију (ИПТ) су произвели експерименталну јединицу за директно синтеровање металног праха.



Слика 2.4 Ласерска фузија [6]

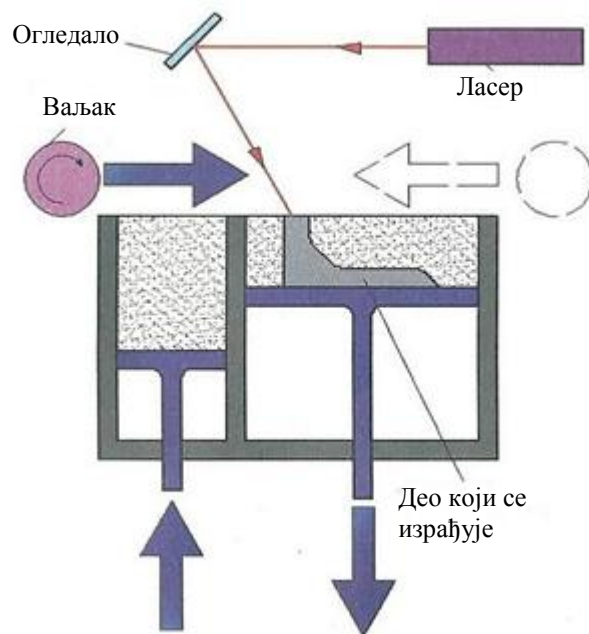
Иако су и DTM и EOS машине базиране на истој методологији, постоје битне разлике у извршним операцијама машина, укључујући и начин снабдевања прашкастим материјалом. DTM машине снабдевају поступак материјалом, из суда, који се креће у супротном смеру у односу на суд у коме се налази део; ваљак се користи да рашири и поравна прах (слика 2.4а). У EOS машинама, прах се распршује кроз отвор млазника, који је постављен на глави млазника који се креће с једне на другу страну (слика 2.4б). На глави је извађена ивица која попут лопатице, шири и равна слој праха.

Најчешће коришћени ласери су CO2 ласери, око 50 W. Значајан део енергије ласера се трансформише у топлоту. Топлотна енергија, потребна за процес дифузије, зависи од прашкастог материјала и његових својстава. Потребна излазна снага ласера може бити умањена одржавањем температуре праха на тачки мало испод његове тачке топљења [6].

Поступак израде: За разлику од SLA процеса, где се на материјал делује светлосном енергијом ласерског зрака, у SLS процесу ласер на честице материјала делује својом топлотном енергијом.

Процес почиње наношењем слоја праха на цилиндричну радну површину помоћу специјалног механизма са ваљком који га преузима из касете са прахом и равномерно распоређује по њој (Слика 2.5). Радна комора је конструисана тако да се током читавог процеса у њој одржава температура која је тек нешто испод температуре топљења праха, тако да топлота ласера само мало повећа температуру да би омогућила синтеровање (топљење) праха.

Током растерског скенирања радне површине, ласерски зрак је модулиран тако да се само одређени део праха, који одговара попречном пресеку модела, загрева довољно да се честице отоје. Онда се када са прахом диже и наноси се следећи слој праха. У овом случају нема потребе за носећом структуром, јер висеће елементе модела придржава прах који га окружује. Када је израда дела завршена, део се вади из каде а остатак несинтерованог праха отпада. Слој праха који је остао око дела изољује га тако да се неће хладити превише брзо. Када се део охлади, овај прах се уклања ручно четкицом и компримованим ваздухом.



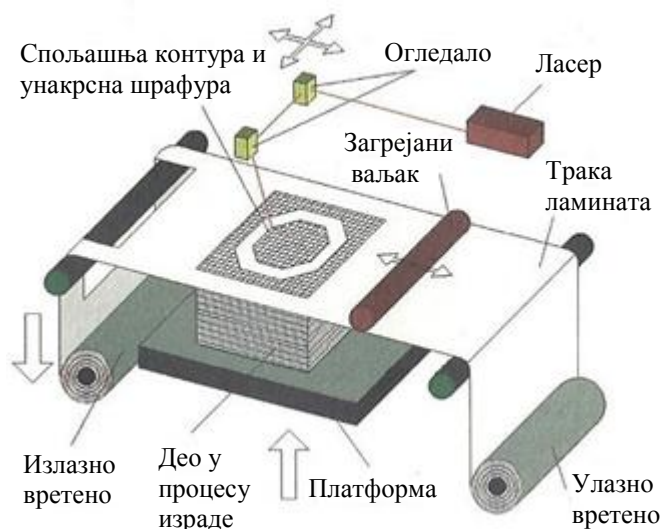
Слика 2.5 Шематски приказ SLS поступка [4]

Овако израђени делови могу захтевати значајно постпроцесирање, као што је пескарење, лакирање и бојење, зависно од намене прототипа.

Технологија селективног ласерског синтерованја се може искористити и за брзу производњу алата за бризгање пластике. Најпре се синтерованјем направе делови алата од мешавине челика (95%) и полимера (5%). После чишћења "зеленог" дела, исти се ставља у пећ да би сагорео везивни полимер. Преостали метал је синтерован али још увек је порозан. Онда се у шупљине инфилтрира бакар да би добијени алат био потпуно од метала. Алат добијен овим процесом може се користити у производњи до 50000 делова коришћењем стандардне опреме за ливење бризгањем [4].

2.4 Производња објеката ламинацијом (LOM)

Принцип рада: Физички модел (прототип) се гради слојевито лепљењем танких ламината, који су обложени са доње стране термички активним адхезивним материјалом, а који могу бити од хартије, пластике, станиола или композитних листова, и њиховим сечењем помоћу CO₂ ласера (Слика 2.6).



Слика 2.6 Механизам LOM процеса [4]

Поступак израде: Слојевити делови раде се од танких ламината израђених од хартије, пластике, станиола или композитних листова. Сви ламинати су обложени термички активном лепљивом материјом (обично воском). Необрађени ламинат је намотан на улазно вретено (вретено за улагање ламината). Ламинат се пребацује преко радне површине и након обраде се његови непотребни делови намотавају на излазно вретено.

Процес градње новог слоја почиње повлачењем траке ламината, тако да необрађени ламинат прекрије радну површину. После нанесеног првог слоја, наредни се наноси повлачењем траке ламината преко радне површине. Затим се преко њега прелази загрејаним цилиндром од нерђајућег челика, чија је улога да одговарајућим притиском и температуром активира лепљење овог слоја за претходни. Сваки слој се сече CO₂ ласером по контурама попречног пресека, који је дефинисан CAD подацима, а вишак материјала или тзв. остатак негатива се такође сече али у облику унакрсне шрафуре, тј. ситних четвороуглова, ради каснијег лакшег уклањања. Овај вишак материјала служи и као ослонац наредним слојевима.

На крају сваког слоја сече се и крајња четвороугаона контура ослобађајући попречни пресек од траке ламината. Након тога се платформа спушта надолу, што омогућава излазном вретену да намота остатак ламината и на тај начин помери траку ламината тако да необрађени ламинат буде у позицији изнад радне површине, спреман за формирање наредног слоја. Цео процес се понавља док се не достигне жељена висина модела. Због тога што постоје варијације у дебљини ламината и везивног материјала, висина модела се мери после сваког слоја, па се тек онда прорачунава попречни пресек геометријског модела за тако добијену висину.

На крају се модел скида са платформе, а вишак материјала (који је већ у току процеса исечен у облику унакрсне шрафуре) се ручно уклања, при чему се води рачуна да се не оштети и сам модел [4].

2.5 Ink - Jet штампање

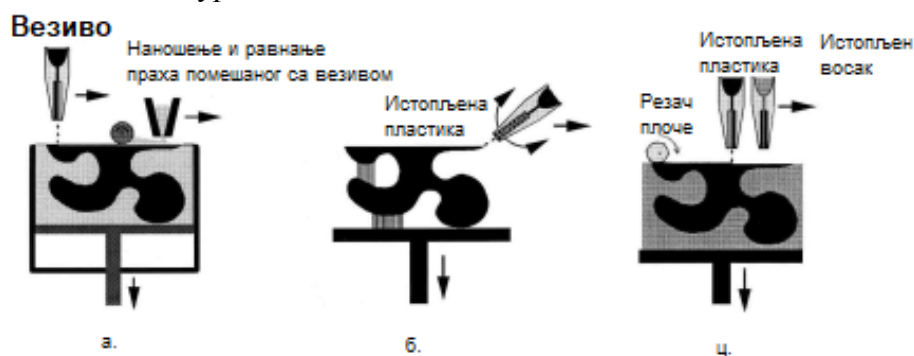
Неколико SFF поступака искористило је предност ink-jet технологије за штампање слојева структуре производа. Први поступак који је успешно демонстрирао "штампање" облика био је 3D printing (3DP), приказан на слици 2.7а који је развијен као метод за стварање сирових предоблика (МИТ), примењених у металургији праха. С обзиром да се могу користити различити материјали у праху, 3DP је тренутно комерцијализована од стране Soligen Корпорације (САД) под именом Direct Shell Production Casting (DSPC) за креирање керамичких чаура и језгара за ливење.

Најбитније карактеристике 3DP поступака:

- Везивни материјал се "штампа" на невезани слој праха;
- Површина израде може постати врло закошена;
- Није тако утемељена као SLA и SLS технологије.

У 3DP технологији део се гради у резервоару са клипом, који спушта део у резервоару за одређени корак. Прах (као што је алуминијумски) испушта се из левка изнад резервоара, док се ваљак користи да рашири и изравна слој праха. Ink - jet глава штампача прелази преко површине праха и селективно убризгава везивно средство (као што је колоидни силикон) у прах. Везиво међусобно спаја прах на оним подручјима дефинисаним геометријом попречних слојева дела. Невезани прах постаје потпорни материјал. Када је облик потпуно израђен, сирова структура се жари, и тада се део вади из невезаног праха. 3DP технологија металног праха, какав је нерђајући челик, везује се са полимером као везивом, и такође је у фази истраживања; у том се случају захтева да се везивни материјал истовремено уноси и у потпорни прах да би се омогућило очвршћавање метала.

Тренутне напоре улаже Технички Универзитет у Минхену у развој "модификованог" 3D printing поступка који убризгава струју смоле која очвршћава под дејством UV- зрака. Такође, МИТ и Универзитет у Калифорнији, развија систем млазника за наношење металних легура.



Слика 2.7 Поступци Ink - jet printing- а

а) 3D Printing (3DP), MIT

б) Ballistic Particle Manufacturing (BPM), BPM Technology Inc. SAD

в) Model Maker System, Sander's Inc. SAD [6]

Остали поступци користе ink-jet технологију за директно наношење циљаних материјала ниских тачки топљења. Ballistic Particle Manufacturing (BPM) развијена од стране BPM Tehnology, (SAD), користи пиезоелектрични млазни систем за наношење микроскопски малих делова растопљених термопласта (Слика 2.7б). Као у FDM и SLA технологији, захтева се потпорна структура за "неповезане" секције објекта. Потпоре су нанете као шупљикаве структуре да би се брже уклониле. BPM jet - глава је међутим постављена на позиционом механизму са пет оса, тако да се препусти на делу могу наносити без потпоре, како се види на слици 2.7.

Најбитније карактеристике Sanders Model Maker - технологије:

- Изузетна прецизност допушта коришћење у индустрији накита;
- Тачност је делимично повећана додатком за уклањање обликачем после сваког нанетог слоја;
- Штампачки систем може да бризга материјале од чврстог до течног стања - и термопласте и воскове;
- У поређењу са SLA и SLS технологијом није толико утемељена.

Model Maker System, Sander's Inc. (САД), испушта оба материјала истовремено. Термопласт ниске тачке топљења и одвојено воштани материјал за потпору. Као додатак, овај систем укључује обликач да поравна и уклони вишак са сваког слоја до прецизно дефинисане дебљине. Глатка површина високог квалитета може се постићи ако се најпре истрасирају контуре пре но што се испуни унутрашњост омеђена контуром слоја (Слика 2.7ц) [6].

3. Материјали за израду делова 3Д штампом

У зависности од технологије 3Д штампе могуће је класификовати материјале за:

1. Моделирање депоновањем истопљеног материјала (FDM)
2. Стереолитографија (SLA)
3. Селективно ласерско синтеровање (SLS)
4. Производња објеката ламинацијом (LOM)
5. Ink - Jet штампање

3.1 Материјали који се користе код FDM поступка

Неки од комерцијалних материјала који се користе у процесу моделирања депоновањем топљеног материјала (FDM) су:

ABS (P400). Неке карактеристике овог материјала су:

- дуготрајна врста пластике,
- служи за израду прототипова у сврху функционалних испитивања,
- расположив у више боја (бела, црна, црвена, плава, зелена, жута),
- даје могућност завршне обраде (бушење, пескарење, превлачење итд.).

ABS (P500). Неке карактеристике овог материјала су:

- дуготрајна врста пластике са већом отпорношћу од нормалног ABS-а,
- посебна врста ABS материјала који је отпоран на ударна оптерећења,
- отпоран је на хемијски активне медије,
- производ је најчешће прозиран,
- најчешћу примену има у медицини и ауто индустрији.

Медицински ABSi. Неке карактеристике овог материјала су:

- није токсичан,
- расположив у више боја.

PC (Поликарбонат). Неке карактеристике овог материјала су:

- има широку примену у ауто индустрији, ваздухопловству, медицини и др.,
- има бољу стабилност и издржљивост од осталих,

- много боље механичке карактеристике од ABS-а и других термопласта,
- PC ISO има велику примену при паковању хране и лекова.

E20 (еластомер на бази полиестра).

- сличан материјал се користи за израду изолације, цеви итд.

ICW06 (восак за прецизно ливење).

- врло мали удео пепела (0.0040%) [4].

3.2 Материјали који се користе код стереолитографије (SLA)

Неки од комерцијалних материјала који се користе у процесу стереолитографије су:

WaterShed (фотополимер на бази епоксида који опонаша многа својства пластомера PBT - полибутилентерефталат). Неке карактеристике овог материјала су:

- низак коефицијент апсорпције влаге (0.24%),
- у влажним условима задржава добра механичка својства

Somos 9100 (епоксид на бази фотополимера који опонаша многа својства полипропилена). Неке карактеристике овог материјала су:

- добра жилавост,
- висока ударна чврстоћа,,
- отпорност на влагу,
- користи се за анализу облика и димензија,
- користи се за израду узорака и лагана функционална испитивања.

Somos 8100 (такође, епоксид на бази фотополимера). Карактеристике овог материјала су:

- полукрут материјал,
- отпоран на влагу,
- користи се за анализу облика и димензија,
- користи се за израду узорака и лагана функционална испитивања.

ACCURA SI 40 (фотополимер који опонаша својства полиамида). Неке карактеристике овог материјала су:

- отпорност на високе температуре,
- добра жилавост,
- отпоран на влагу,
- користи се за анализу облика и димензија.

ACCUDUR (фотополимер). Неке карактеристике овог материјала су:

- 30% брже стварање прототипа,
- отпоран на влагу,
- користи се за анализу облика и димензија и за функционална испитивања [4].

3.3 Материјали који се користе код селективног ласерског синтеровања (SLS)

Следећи материјали су комерцијално доступни:

Полиамид. DuraForm је термопластични материјал који се користи за израду грубих функционалних пластичних прототипова или делова који треба да имају знатну тврдоћу. Израђени делови трајно задржавају свој облик и тачност, и отпорни су на термичке и хемијске утицаје. По потреби делови се могу накнадно машински обрађивати. Компанија 3D Systems нуди више врста DuraForm-а, од којих су најзаступљенији Polyamide и Glass-Filled. DuraForm Polyamide има просечну величину зрна $58\mu\text{m}$ (од мин. 25 до мах. 92), модул еластичности 1285MPa и релативно издужење у тачки лома 9%. DuraForm Glass-Filled је композит на бази полиамида, са стакленим честицама, који има просечну величину зрна $48\mu\text{m}$ (од мин. до мах. 96), модул еластичности 3300MPa и релативно издужење у тачки лома 2%. Температура топљења за оба материјала је око 185°C . Средње аритметичко одступање профила делова израђених на Vanguard систему је за Polyamide $R_a=8.5\mu\text{m}$, а за Glass-Filled $6.2\mu\text{m}$. Међутим, након додатног полирања одступање се може свести на 0.13, односно $1.0\mu\text{m}$.

Термопластични еластомер. Somos 201 је погодан за израду прототипова и делова који ће имати особине тврдых термопластичних еластомера. Делови направљени од овог материјала имају велику еластичност, непромочиви су, отпорни су на хабање, температуру и хемијска средства. Просечна величина зрна Somos-а је $93\mu\text{m}$ (од 23 до $190\mu\text{m}$), а тачка топљења 156°C . Модул еластичности битно зависи од температуре, а на 23°C износи 13.4MPa . Релативно издужење на тачки кидања је 110%, што показује његову хипереластичност.

Полистирен. CastForm Polystyrene се користи за израду прототипова који се даље употребљавају као језгра у процесу ливења у кошуљици. По својим особинама и понашању, овај материјал је врло сличан стандардном ливачком воску. Након сагоревања овог материјала готово уопште не остаје пепела, јер је његов проценат само 0.02%, што га чини посебно погодним за израду ливачких језгара. Просечна величина зрна овог материјала је $62\mu\text{m}$ (од 25 до $106\mu\text{m}$), а тачка топљења је мања од 63°C . Средње аритметичко одступање профила делова израђених на Vanguard систему је за CastForm $13\mu\text{m}$, а након полирања се може добити $3\mu\text{m}$.

Поликарбонат. То је стандардна индустријска термопластика. Овај материјал је погодан за израду концепцијских и функционалних модела и прототипова, оригинала за прецизно ливење за металне прототипове и ливачке алате, мастер моделе за процесе умножавања, и шаблона за ливење у песку. Захтева малу снагу ласера, од 10 до 20W, и

погодан је за визуелизацију модела и радне верзије прототипова који не трпе велика оптерећења. Овакви делови могу се изградити за кратко време и одлични су за прототипове и шаблоне са финим детаљима.

Метал. LaserForm је специјални прашкасти материјал који се састоји од зрнаца нерђајућег челика обложених полимером који има улогу везивног средства током процеса синтеровања. Израђени делови су након синтеровања порозни, па се након грађења делова у посебним пећима врши инфилтрирање бронзе. Уливање бронзе даје коначном алату термичку проводљивост готово два пута већу од већине алатних челика. LaserForm се користи за израду металних делова, а посебно за делове алата за бризгање пластике који могу да издрже и преко 100000 циклуса бризгања. Карактеристике делова израђених од овог материјала су врло блиске онима од челика. Поседује високу издржљивост и термичку проводљивост, и може се користити за производне алате релативно велике серије. Делови добијени од овог материјала се могу накнадно обрађивати стругањем или електроерозијом, а по потреби се могу платинирати. Посебно је погодно што се током израде делова алата истовремено остављају шупљине за уливне и канале за хлађење. LaserForm омогућује израду и врло малих техничких елемената реда 0.5 до 0.6 μm . Продаје се под називом LaserForm А6, и одличан је за израду језгара и предсеријских алата за ливење под притиском. Алтернатива му је композит бакар-полиамид-метал полимер који се користи за израду алата за ливење пластике под притиском у мањим серијама.

Керамика. Компанија EOS нуди више врста керамички материјала, међу којима су Ceramics 5.2 и Quartz 5.7. Они се састоје од алуминијум-силиката или кварцног песка пресвученог фенолном смолом. Користе се за израду пешчаних језгара и калупа за ливење металних делова у песку [4].

3.4 Материјали који се користе код производње објеката ламинацијом (LOM)

За градњу модела LOM поступком се могу користити сви ламинирани материјали који се могу обложити термо-везивним материјалом. Ово су углавном јефтине материјали па ни цена модела није висока. Могуће је користити мноштво органски и неорганских материјала као што су: папир, пластика, керамика, композити и др [4].

Иако се за ламинирање лимова могу користити најразличитији материјали, сваки материјал користи различите методе везивања. Најчешћи материјал за ламинирање лимова је папир са претходно нанетим лепком где се топлота и притисак користе за активирање лепљивог слоја.

Полимери користе топлоту и притисак без лепка, јер се ослањају на топљење листова заједно. Метални лимови се везују ултразвучним заваривањем, док материјали као што су материјали на бази влакана и керамика користе топлотну енергију у облику печења у пећници за комбиновање слојева (Табела 1.) [24].

Табела 1. *Врсте процеса ламинације лимова и врсте материјала који се користе [24]*

Процес	Материјал
LOM	папири
PSL	већина полимера
SLCOM	угљенична влакна, стаклопластика (фиберглас), арамидна влакна (Kevlar), PBO (најлон), заједно са металним влакнима попут челика, алуминијума или титана
CAM-LEM	алумина, друга керамика доступна за употребу у нашим процесима укључује цирконијум, цирконијум ојачану алумином, силицијум, и разноврсна оксидна и неоксидна керамика
SDL	стандардни папир
CBAM	тканине од других влакана везане са термопластичним матричним материјалима. Угљенична влакна у комбинацији са Nylon 12, PEEK и стаклена влакна са Nylon 12 и PEEK.
UAM	широк спектар комбинација материјала може се штампати као било који материјал који се може заварити у један део отварајући простор за дизајн, како би се омогућили градијенти својстава и инжењерска својства материјала за веће перформансе.

3.5 Материјали који се користе код Ink - Jet штампања

У употреби су следећи основни материјали:

1. Прах на бази скроба. Продају се под ознакама zp14 и zp15e, уз употребу zb51 везивног средства. Прах zp14 користи се за прецизно ливење и ливење са топлим моделима, а zp15e користи се у комбинацији са уретанским инфилтрантом за савитљиве делове.
2. Прах на бази гипса. Ови материјали имају ознаке zp102 и zp250, и користе се са везивним средством zb56 користе се за израду презентационих модела и функционалних прототипова, и немају скупљање приликом сушења.

3. Прах за израду калупа. Јединствена могућност 3DP технологије је израда калупа и језгара за директно ливење обојених метала. Комбинацијом гипса са ливачким песком добијен је прах са добром температурном постојаношћу. Назив ове патентиране технологије је ZCast, а материјала је ZCast 500. Користи се са zb56 везивним средством [4].
4. Метали: а) индијум (In), калај (Sn), олово (Pb), цинк (Zn); б) злато (Au), сребро (Ag) и бакар (Cu).
5. Керамика: а) оловни цинконат титанат; б) баријум стронцијум титанат; в) церијум оксид; г) алуминијум оксид; д) силицијум нитрид; ђ) титанијум диоксид.
6. Полимери : PEDOT, PSS, PEDOT:PSS.
7. Биолошки материјали [8].

4. Савремени обрадни системи за 3Д штампу

На тржишту постоји велики избор машина за 3Д штампање. Машине на тржишту се могу поделити на три категорије тј. класе (Слика 4.1):

1. лични (персонални) 3д принтери,
2. канцеларијски (професионални) 3д принтери
3. производни (индустријски) 3д принтери

Лични (персонални) 3д штампачи (fabbers, personal 3D printers) се обично односе на мале, једноставне и јефтине машине. Уколико користи приватно лице или група приватних лица код куће или неког заједничког простора онда се више називају персоналним штампачима. Цена им се креће до 20000 еура мада могу се пронаћи и испод 1000 еура.

Професионални 3Д штампачи (office printers, professional 3D printers) се користе у канцеларијском окружењу или радионицама. То значи да емитују минималну буку, мирис и честице. Материјал који се допуњује у машину обично се испоручује у кетрицима. Руковање је једноставно као и руковање деловима машине, укључујући накнадну обраду. Ови штампачи се могу набавити у ценовном рангу од 20000-140000 еура.

Производни (индустријски) 3Д штампачи (shop floor machines, production 3D printers) захтевају индустријско окружење, укључујући обучено особље као и логистику. Дизајнирани су за високу производњу и продуктивност, што значи да могу користити велики број различитих материјала. Цене се крећу од 140000-800000 еура па и више [7].

Персонални 3Д штампач	Професионални 3Д штампач	Производни 3Д штампач
		
3D Systems BFB 3000	Objet Eden 500 V	Stratasys Fortus 900 mc

Слика 4.1 Класификација 3Д машина у односу на ниво примене; примери 3Д машина [7]

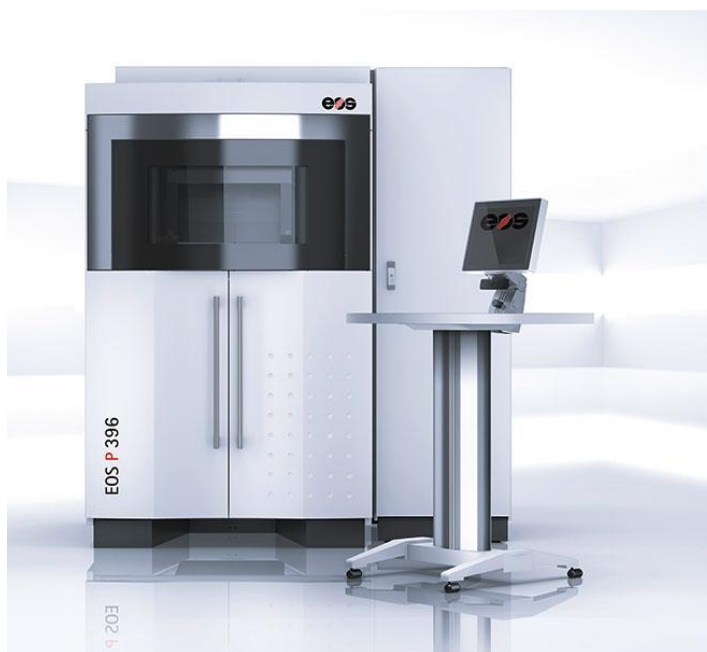
У овом раду посебна пажња посвећена је производним (индустријским) 3Д штампачима који све више налазе примену, осим у изради прототипова, и у серијској производњи готових функционалних делова.

У серијској производњи готових функционалних делова највише се користе технологије SLS и SLA поступци 3Д штампања.

4.1 Производни (индустријски) 3Д штампачи који користе SLS технологију

Након скока са стереолитографије на селективно ласерско синтеровање (SLS) 1994. године, EOS је постао најпопуларнији произвођач SLS 3Д штампача на свету. Тренутно компанија производи две врсте SLS машина, за пластику и за метале.

EOS P 396 је машина средње запремине која може синтеровати разне пластичне материјале у сврху израде прототипова и серијске производње (Слика 4.2).

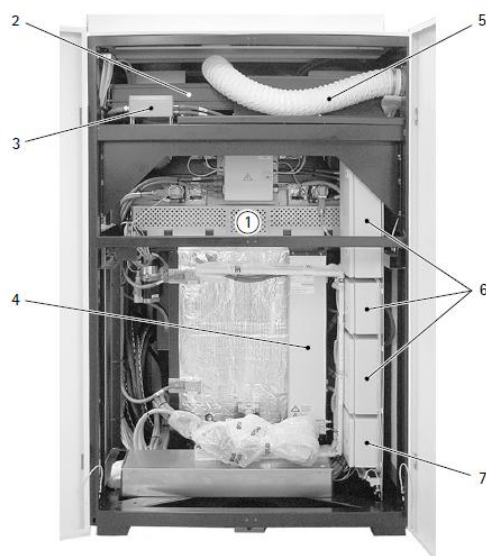


Слика 4.2 EOS P 396

EOS P 396 је надоградња на претходни EOS P 395 програм компаније, побољшавајући свог претходника у погледу брзине и ефикасности. Према произвођачу, новија машина троши 38% мање енергије и 3Д штампа до 32% брже. То је делимично захваљујући употреби новог ласера, повратног средства за брзо распршивање праха са малим трошењем и новог тачкастог пирометра који мери температуру праха ради побољшања прецизности поступка поновног наношења. Поседује запремину израде од 340x340x600 mm, EOS P 396 може да штампа предмете брзином приближно 48 mm /h и дебљином слоја до 60 микрона. Све ово зависи од употребљеног материјала.

Најпопуларнији материјал који се користи у свим SLS машинама је полиамид (PA), типично познат у свом синтетичком облику као најлон. EOS P 396 може да обрађује широк спектар PA материјала, укључујући мешавине алуминијум - PA, који успорава пламен, PA, PA ојачан карбонским влакнима и друге специјалне PA прашове. С обзиром на свестраност PA, као и на његову релативну снагу, овај систем је способан да произведе низ функционалних компоненти и прототипова за индустријске, ваздухопловне, аутомобилске, медицинске, накитне и друге примене. Поред тога, овај систем може 3Д штампати полистиреном, што га због ниске тачке топљења и тачности димензија чини корисним за стварање образаца за улагање у ливење.

Као технологија фузије прашкастих слојева, SLS користи извор топлоте, посебно моћан ласер, за спајање праха материјала у тродимензионални објекат (Слика 4.3). У случају EOS P 396, танак слој праха се шири преко платформе за изградњу унутар интерне коморе за гас азота пре него што 70W CO2 ласер растопи прашове. Платформа се накнадно спушта и на слој се наноси још један слој праха, у којем тренутку ласер још једном чини своју магију. Овај поступак се наставља све док објекат не буде завршен.



Слика 4.3 Задња страна машине EOS P 396 са означеним деловима машине [20]

Табела 2. Задња страна машине, ознаке [20]

1 - X оса поклопца
2 - Ласер
3 - Ласерска термална кутија
4 - Генератор азота
5 - Црево за вентилацију скенера
6 - Машинске прикључне кутије
7 - Прикључна кутија система за хлађење

Употреба ласера за прецизно синтеровање пластичног праха омогућава висок ниво детаља при већим брзинама од FDM поступка. Прашак који окружује штампани предмет делује као помоћни материјал, дозвољавајући могућност нарочито сложених отисака, укључујући покретне делове. Једном када се отисак извади из штампача, очисти ваздухом и стави у машину, предмет је спреман за полазак. Што се тиче накнаде обраде, SLS је нешто мање временски захтеван од многих других метода 3Д штампања.

Упркос својој прецизности, SLS пластични отисци често се одликују донекле грубом завршном обрадом. Поред тога, јер се несинтеровани прах у подручју градње такође загрева до тачке испод тачке топљења, материјал се не може поново користити. Уместо тога, прах се меша са новим материјалом да би се постигли потребни резултати. Остали проблеми који се јављају са SLS пластичним деловима су њихова укупна порозност и ограничене доступне боје, иако EOS ради на томе да то промени улагањем у компанију DyeMansion, која развија нове процесе за SLS [13].

Табела 3. Техничке карактеристике 3Д машине EOS P 396 [14]

Димензије штампања	340 x 340 x 600 mm
Тип ласера	CO2 ; 70 W
Стопа градње	до 3,0 l/h
Дебљина слоја (зависи од материјала)	0.06 – 0.10 – 0.12 – 0.15 – 0.18 mm
Прецизна оптика	F-theta lens, high-speed scanner
Брзина скенирања током процеса израде	до 6 m/s
Напајање	400 V / 32 A, max напајање 16 A
Потрошња струје	2.1 kW; max 10 kW
Димензије машине (дужина x ширина x висина)	1840 x 1175 x 2100 mm
Препоручени простор за уградњу	4.3 x 3.9 x 3.0 m
Тежина	1060 kg
Софтвер	PSW 3.8, EOSCONNECT (open interface OPC-UA, Web API), Smart Scaling
Материјали	PA 1101, PA 1102 black, PA 2200, PA 2201, PA 2210 FR, PrimePart FR (PA 2241 FR), PA 3200 GF, Alumide, EOS TPU 1301, PP 1101, PrimeCast 101, ALM FR-106, ALM HP 11-30, ALM PA 640 GSL
Додатна опрема	IPCM P plus, Big Bag emptying station, unpack-and sieving station, blasting cabine
Цена машине	око 300000 еура

EOS Formiga P 100 представља ласерско синтеровање у компактној класи. Са димензијама штампања од 200 mm x 250 mm x 330 mm, EOS Formiga P 100 производи пластичне производе од полиамида или полистирена у року од неколико сати и директно из CAD података. Машина је идеална за економичну производњу малих серија и индивидуализованих производа сложене геометрије - захтеве који испуњавају између осталог код индустрије медицинских уређаја као и на производе широке потрошње. У исто време, обезбеђује капацитет за брзу и флексибилну производњу потпуно функционалних прототипова. За мање од 24 сата EOS Formiga P 100 се савршено интегрише у производно окружење које захтева највиши ниво флексибилности. Систем се одликује такође релативно ниским инвестиционим трошковима (Слика 4.4).



Слика 4.4 EOS Formiga P 100 [17]

Машина својим корисницима нуди неколико техничких иновација. Дизајниран је да производи вертикалне зидове са максималним квалитетом површине. Изузетно фини пречник фокуса омогућава дебљину зида од само 0.4 mm. Систем је погодан за мале, филигранске компоненте као што су конектори. Револуционарни систем за дозирање и поновног премазивања осигурава висок квалитет производа и стабилност процеса. Кроз неколико нових карактеристика, машина је изузетно једноставна за употребу и захтева само минимум додатне опреме. Као резултат тога, потрошња струје је релативно ниска што доводи до смањених оперативних трошкова. EOS Formiga P 100 је први ласерски синтеровани систем који пролази кроз врата (мале димензије). Као резултат, мали су захтеви за услове постављања. Инсталација и подешавање система су такође поједностављени и сада се спроводе у року од једног радног дана.

Због својих ергономских периферних уређаја и високог степена аутоматизације, EOS Formiga P 100 нуди једноставно руковање, оптималан ниво продуктивности као и изврсну интеграцију у индустријско окружење. Станица за распакивање и просејавање и интегрисана рециклажа праха чине део интегрисаног управљања процесним ланцем (IPCM). Додатна продуктивност постиже се употребом EOSPACE-а. Као последица, смањује се време трајања процеса и трошкови. EOS Formiga P 100 нуди флексибилан, исплатив и високо продуктиван улазак у свет ласерског синтеровања [16].

Табела 4. *Karakteristike EOS Formiga P100 [15]*

Димензије штампања	200 mm x 250 mm x 330 mm
Брзина израде (зависно од материјала)	до 24 mm висине/h
Дебљина слоја (зависно од материјала)	0.1 mm
Тип ласера	CO ₂ , 30W
Прецизна оптика	F-theta lens
Брзина скенирања током процеса израде	до 5 m/s
Напајање	16 A
Потрошња струје (номинална)	2 kW
Снабдевање компримованим ваздухом	мин 6000 hPa; 10 m ³ /h
Димензије машине са посудом за прах и додирним екраном	1320 mm x 1067 mm x 2204 mm
Препоручени простор за уградњу	3.2 m x 3.5 m x 3 m
Тежина	600 kg
Станица за мешање праха	700 mm x 500 mm x 1,000 mm
Станица за распакивање и просејавање	1200 mm x 700 mm x 1500 mm
Софтвер	EOS RP Tools; Magics RP (Materialise)
CAD интерфејс	STL
Цена машине	око 175000 еура

EOS M 400 омогућава производњу металних делова директно из CAD података без потребе за алатима (Слика 4.5). Карактеристике EOS M 400 машине су приказане у табели 5.

**Слика 4.5** *EOS M 400 [19]*

Табела 5. Карактеристике EOS M 400 [18]

Димензије штампања	400 x 400 x 400 mm
Тип ласера	Yb fiber laser, 1000 W
Прецизна оптика	F-theta-lens
Брзина скенирања	до 7.0 m/s
Напајање	50A
Потрошња струје	16.2 kW; max 20.2 kW
Димензије машине (дужина x ширина x висина)	4181 x1613 x 2355 mm
Препоручени простор за инсталацију	мин 6500 x 6000 x 3300mm
Тежина	приближно 4635 kg
Софтвер	EOSPRINT 2, EOS RP Tools, EOSTATE, EOSCONNECT Core, Materialise Magics RP with SG+ and further modules
Довод компримованог ваздуха	7000 hPa, 20m ³ /h
Пречник фокуса	око 90 μm
Материјали:	AlSi10Mg, AlF357, MS1,IN718,Ti64,Ti64ELI
Препоручени простор за уградњу	мин 6500 x 6000 x 3300 mm
Софтвер	EOSPRINT 2, EOS RP Tools, EOSTATE, EOSCONNECT Core, Materialise Magics RP with SG+ and further modules
Цена машине	преко 750000 долара

4.2 Производни (индустријски) 3Д штампачи који користе SLA технологију

Најпопуларнији произвођач SLA 3Д штампача на свету је фирма 3D Systems. Неки од познатијих типова SLA машина фирме 3D Systems је модел ProX 950 (Слика 4.6) и ProJet 7000 HD.



Слика 4.6 3Д машина ProX 950 [10]

ProX 950 3Д штампач за стереолитографију (SLA) је најновији додатак линији SLA штампача фирме 3D Systems, иноватора SLA технологије штампања. Захваљујући најновијој технологији PolyRay главе штампача фирме 3D Systems, ProX 950 3Д штампач може израђивати прецизне делове и до 10 пута брже од других 3Д штампача у својој класи. ProX 950 омогућава да се практично елимише било које ограничење величине и гломазну завршну обраду штампајући делове до 1.5 m ширине у комаду без потребе за лепљењем или састављањем (монтажом). Од жилавости сличне ABS-у до кохерентности сличне поликарбонату, ProX 950 користи најшири избор доказаних SLA материјала високих перформанси који су квалификовани за најзахтевнију авиоиндустријску, медицинску и индустријску употребу. Користећи сав неискоришћени материјал у систему, ProX 950 има минимални отпад, што доводи до ефикаснијег и профитабилнијег решења за 3Д штампу. Комбинација ових најсавременијих карактеристика заиста чини 3Д штампач ProX 950 највећим форматом, најбржим, најтачнијим и најзеленијим 3Д штампачем који је данас доступан [9].

Табела 6. Карактеристике 3Д машине ProX 950 [11]

Технологија 3Д штампе	Стереолитографија (SLA)
Снага/тип ласера	1450 mW/Nd: YVO4 with SteadyPower
Таласна дужина ласера	354.7 nm
Распон дебљине слоја	мин 0.05 mm; мах 0.15 mm
Брзина скенирања	3.5 m/s до 25 m/s
Материјали	Accura 25, Accura CastPro
Мах димензија одштампаног дела	1500 x 700 x 550 mm
Димензије машине	220 x 160 x 226 mm
Тежина машине	2404 kg
Електрични захтеви	200 - 240 VAC 50/60 Hz, једнофазна 50 amps
Прибор	Ручна колица за истовар, необавезна; ProCure 1500 UV Finisher
Формат датотеке улазних података	.stl /.slc
Цена машине	500000 долара

ProJet 7000 HD је новија машина фирме 3D Systems (Слика 4.7) која је веома популарна за израду готових функционалних делова са одличним спецификацијама машине (Табела 7.).

**Слика 4.7 ProJet 7000 HD [21]**

Табела 7. Карактеристике 3Д машине ProJet 7000 HD [21]

Димензије кутије 3Д штампача	1860 × 982 × 2070 mm
Димензије 3Д штампача	984 × 854 × 1829 mm
Тежина кутије 3Д штампача	363 kg
Тежина 3Д штампача	272 kg
Формати датотека улазних података	STL и SLC
Распон радне температуре	18-28 °C
Струја	100 - 240 VAC, 50/60 Hz, монофазна, 750 W
Сертификација	CE marked
Мрежна компатибилност	Network ready with 10/100 Ethernet interface 4MB
Бука	< 65 dBa процењено
Резолуција	HD - 0.125 mm UHD - 0.100 mm XHD - 0.050 mm
Материјали	VisiJet® SL Flex, VisiJet® SL Tough, VisiJet® SL Clear, VisiJet® SL Black, VisiJet® SL Impact, VisiJet® SL HiTemp, VisiJet® SL Jewel
3Д управљање оперативним системом	Windows XP Professional, Windows Vista, Windows 7
Опциони прибор	UV Curing Units, ProJet® Cart Station
Тачност	(0.025-0.05 mm за 25.4 mm) димензије дела

CARBON помера границе брзе производње са Carbon M2 машином, делом њиховог система SpeedCell. Упркос двоструко већој запремини израде M1, Carbon M2 машина израђује производне делове квалитета од 75 микрона у X-Y равни. Такође нуди натпросечан однос цене - запремине у односу на индустријске штампаче (189 x 118 x 326 mm³) и креће се брзином за коју Carbon тврди да је 25-100 пута бржа од традиционалних метода (Слика 4.8).

**Слика 4.8** Машина Carbon M2 [22]

M2 је део производног система названог SpeedCell, која додаје неопходан део опреме за накнадну обраду- Smart Part Washer и компанијски софтвер за управљање.

Систем је доступан у два формата, дизајн и производња.

Carbon са Adidas-ом ради од 2015. године на пројектима попут Futurecraft, патике израђене 3Д штампом (Слика 4.9).



Слика 4.9 Adidas Futurecraft 4D [25]

Техничке спецификације: Списак доступних спецификација које је Carbon јавно објавио прилично је кратак. Вероватно више воле да размене више детаља када ступе у контакт са купцем, с обзиром да M2 представља велику инвестицију (Табела 8.).

Табела 8. Карактеристике машине Carbon M2 [23]

Компанија	Carbon
Апликација	Производња
Индустрија	Аутомобилска, ваздухопловна, стоматолошка
Технологија 3Д штампе	DLS
Мах димензије одштампаног дела	189 x 118 x 326 mm ³
Резолуција	75 μm
Материјали	MPU 100, EPU 40, EPU 41, SIL 30, RPU 70, FPU 50, CE 221, EPX 82, UMA 90, DENCTA Denture (Base, Teeth, Try-in), Dreve FotoDent, Whip Mix Surgical Guide, DPR 10
Конекција	USB, Ethernet
Припрема за штампу	Carbon-ов власнички софтвер
Димензије машине	540 x 654 x 1734 mm ³

Сада, са додатних 200 милиона долара прихода више од GE и BMW-а, компанија Carbon процењује се на више од милијарду долара, што је чини једним од најубудљивијих компанија за праћење у индустрији 3Д штампе.

Carbon M2 користи компанијску власничку технологију за израду делова очвршћавајући их UV светлошћу. CLIP је сличан уобичајеној 3Д штамп "одоздо према горе" стереолитографије (SLA). Он зрачи UV светлост од LED пројектора према горе. Да би аутоматизовала поступак прања у оквиру Карбоновог већег SpeedCell система, компанија нуди Smart Part Washer. Ова потпуно затворена машина за прање умрежена је за примање прилагођених инструкција за сваки посао (који могу варирати зависно о површини и запремини дела). Као резултат, један од највише ручних, дуготрајних делова процеса постаје потпуно аутоматизован.

M2 је доступан као претплатна услуга са минималним трогодишњим уговором, по цени од 50000 долара годишње. Уколико се M2 дода паметна машина за прање (10000 долара годишње) и обавезни пакет додатне опреме (једнократна куповина од 12500 долара) за 192500 долара се добија пуна опрема SpeedCell система (Слика 4.10). То је прилично задовољавајућа цена у подручју индустријских штампача који обично коштају између 500000 и 1000000 долара [23].



Слика 4.10 Опрема SpeedCell система [23]

WarpSPEE3D (Слика 4.11) је први метални 3Д штампач великих формата који користи патентирану SPEE3D технологију која омогућава знатно бржу, више исплативију и ефикаснију производњу од традиционалне производње. SPEE3D процес је такође 100 до 1000 пута бржи од традиционалне 3Д металне штампе, што представља најбржи начин да се претвори дизајн у штампани део који се може користити. Ова огромна брзина трансформише металну 3Д штампу од корисне за прототипове или производње мале запремине у решење за производњу у реалном свету.



Слика 4.11 WarpSPEE3D штампач [12]

Иновативна LightSPEE3D машина показала је да би 3Д штампање могло бити брзо и исплативо. Развој новог WarpSPEE3D штампача великих формата доказује да 3Д штампање метала сада може бити брз, економичан и процес широке примене.

Иако је LightSPEE3D идеалан за експериментацију материјала, развој процеса и штампање ситних делова, због повећане величине штампе, WarpSPEE3D машина је усмерена ка серијској производњи. Цена овог штампача је 600000 - 650000 долара.

Са брзином од 100°/мин, максималан део димензија од $\varnothing 1000 \times 700$ mm и максималну тежину од 45 kg, WarpSPEE3D је у стању да произведе индустријске компоненте у року од неколико сати, за чију производњу би требало 6 - 12 месеци помоћу традиционалних метода за ливење.

SPEE3D је у потпуности прилагодив омогућавајући предузећима да штампају појединачне делове или делове серијске производње до 10000 делова, и да при томе још увек остане конкурентна са ценама у односу на традиционалне методе ливења. Warp SPEE3D је такође у стању да произведе групе компоненти или читавих сетова у једном штампању.

SPEE3D доноси флексибилност 3Д штампе прерађивачкој индустрији, омогућавајући да се са лакоћом штампају делови на захтев, без обзира да ли је потребан један део или 10000 делова. Са овим штампачима пружа се могућност израде прототипа и производње делова на истом рачунару.

SPEE3D штампачи су једини светски метални штампачи за штампање делова по захтеву и цени која је конкурентна са традиционалном производњом. Резултат је производња металних делова по трошковима који су слични процесу ливења, а далеко јефтиније од CNC машинирања дела од кованог материјала.

SPEE3D је развио аутоматски процес који штампа делове мрежног облика са минималним количином сировина. Једина потрошачка потреба за покретање SPEE3D штампача су електроенергетски и сирови метални прашкови. SPEE3D штампачи су такође спремни да оптимално раде са нискобуџетним металним прашком. За разлику од неких других металних 3D процеса штампања SPEE3D штампачи користе компримовани ваздух и не захтевају скупе инертне гасове или вакуум који ће их покретати. Производња делова WarpSPEE3D машином је далеко лакша и сигурнија, производећи исте делове у односу на процес ливења, и много боља за животну средину. Ливење метала (алуминијума посебно) може бити и опасно. SPEE3D елиминише потребу за руковањем растопљених метала и све инфраструктуре неопходне за безбедан рад.

Због ефикасности процеса SP3, WarpSPEE3D производи делове који имају мању утрошену енергетску компоненту од других технологија. Истраживање је показало да је утрошена енергија за ливење алуминијума у распону од 30-38 MJ/kg. У поређењењу WarpSPEE3D производи делове са утрошеном енергијом у опсегу од 18 kJ/s. Ово смањење утрошене енергије доводи до мање потрошње енергије по делу и мањим испуштањима CO₂.

WarpSPEE3D је направљен са опцијом да се додатно смањи утицај на животну средину уградњом соларних панела и покретањем соларне енергије [12].

5. Испитивање триболошких карактеристика материјала

Тродимензионално штампање је производна метода која користи само дигиталну технологију за производњу комада, за разлику од метода обраде као што су глодање, бушење итд. код којих се материјал скида. Иако је фокус технологије 3Д штампе развијен првенствено у сврху прототипа, постало је могуће производити металне конструкције и много шири спектар функционалних делова, са повећаним нагласком на механичким својствима.

FDM (Fused Deposition Modelling) је технологија која се најчешће користи у овој производној методи која се назива адитивна производња. FDM има многе предности, као што су употреба јефтиних материјала, мањак скупе опреме и способност стварања сложене геометрије. Међутим, FDM има ограничења, попут храпавости на површини. Методе које ће уклонити ова ограничења и постићи бољи квалитет површине проучавали су многи истраживачи.

Храпавост одређује перформансе дела јер игра значајну улогу у одређивању начина на који делови реагују са околином. У погледу површина инжењерских материјала, сматра се да храпавост штети перформансама дела. У трибологији, храпаве површине обично имају веће коефицијенте трења од глатких површина и брже се троше. Из тог разлога, површинска структура је уско повезана са својствима трења и хабања површине. Kovan је истакао да на чврстоћу лепљиве везе између 3Д штампаних делова утиче храпавост површине. Утврђено је да дебљина слоја и оријентација штампе у 3Д штампаним деловима имају значајан утицај на чврстоћу приањања. У случају малих дебљина слоја, слој произведен на бочној ивици има највећу чврстоћу лепљења, док у великој дебљини слоја, хоризонтални слој има највећу чврстоћу лепљења [28].

Експериментална испитивања: У овом раду узорци за мерење храпавости површине произведени су помоћу WANHAO Duplicator i3 plus штампача (Слика 5.1) у два узорка од PLA, ABS+ и PETG материјала пречника 1.75 mm произведен у компанији Devil Design, Рољска. 3Д штампач може да произведе модел димензије 200x200x180 mm са тачношћу позиционирања од 12 μm по X и Y оси и 0,4 μm по Z оси.

Принцип рада се базира на топљењу, омекшавању и екструдирању филамента стандардизованог пречника од 1.7 mm кроз млазницу пречника 0.4 mm на радни сто машине чиме се постиже резолуција депозитованог слоја од 0.1 - 0.4 mm. Кретање по x и z оси изводи екструдер, док кретање по y оси изводи радни сто машине (Слика 5.1).



Слика 5.1 *WANHAO Duplicator i3 plus штампач* [27]

Техничке спецификације машине су приказане у табели 9.

Табела 9. *Техничке спецификације машине WANHAO Duplicator i3 plus*

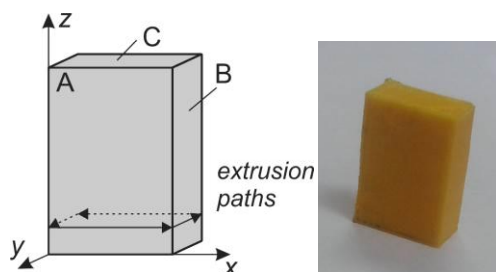
Технологија штампања	Моделирање фузионог таложења Израда фузионисаним филаментом
Димензије радног простора	200 x 200 x 180 mm
Резолуција слоја	0.1 – 0.4 mm
Пречник млазнице	0.4 mm
Брзина штампања	10 – 70 mm/s
Температура екструдирања	170 – 240 ⁰ C
Температура радног стола	30 – 100 ⁰ C

За ову врсту испитивања користили смо материјале различите структуре и различитих техничких карактеристика. Услови експеримента су приказани у табели 10.

Табела 10. *Услови експеримента*

Материјал	PLA	ABS+	PETG
Дебљина слоја	0.15 mm	0.15 mm	0.15 mm
Густина штампања	100 %	100 %	100 %
Брзина штампања	35 m/s	35 m/s	35 m/s
Температуре штампања	220 ⁰ C	200 ⁰ C	230 ⁰ C
Температура стола	70 ⁰ C	50 ⁰ C	90 ⁰ C

Димензије узорака су 11 x 6.3 x 15 mm (Слика 5.2).



Слика 5.2 Димензије узорка

Први део испитивања односи се на мерење уздужне и попречне храпавости узорака који се испитују.

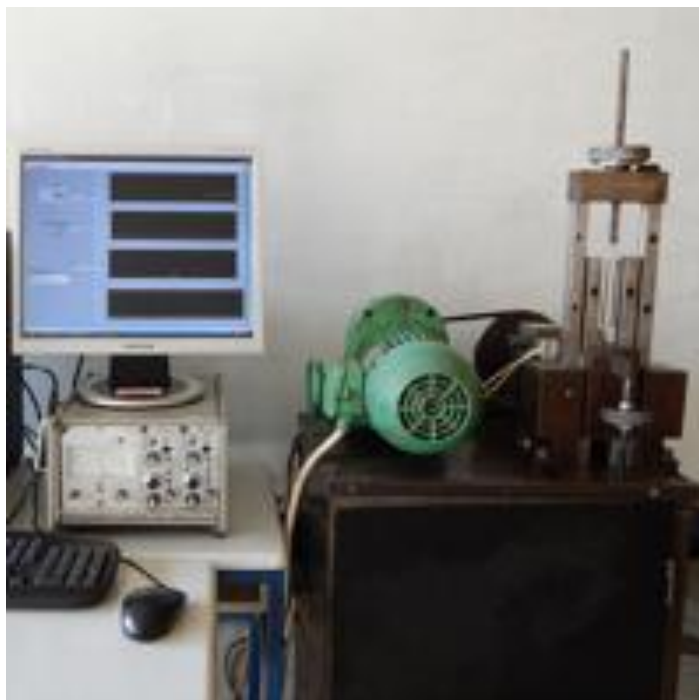
За мерење параметара површине храпавости коришћен је уређај за мерење топографије контактних површина Talysurf-6 (Слика 5.3) произвођача Taylor Hobson из 1988. године. Уређај се налази у Центру за трибологију ФИН у Крагујевцу.



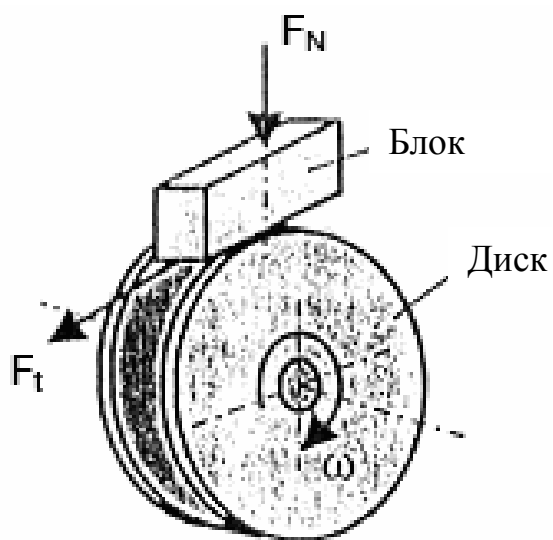
Слика 5.3 Talysurf-6

Други део испитивања односи се на триболошка испитивања коефицијента трења и површинског слоја хабања која су извршена на трибометру TPD-93 (Слика 5.4) контактном геометријом "Block-on-disc" (Слика 5.5), материјала 50CrMo4 и тврдоће 240 HB. Спољашње варијабле на низу узорака биле су сила контакта и брзина клизања.

Трибометар TPD-93 врши варијације услова контакта у погледу облика, димензија и материјала контактних елемената, нормалног оптерећења контакта и брзине клизања.



Слика 5.4 Трибометар TPD-93



Слика 5.5 Контактна геометрија "Block-on-disk" [26]

Материјали који су коришћени приликом испитивања су:

PLA материјал је биоразградива термопластика која се добија из обновљивих избора, попут кукуризног скроба, шећерне трске. То PLA чини еколошки најприхватљивијим материјалом у домену 3Д штампе. PLA је чврст, иако има особину мале кртости. Приликом штампања, PLA је без мириса, са малим скупљањем, добром кртошћу, одличан сјај одштампаног предмета, није потребан грејни штампач, велика брзина штампе, доступан у многим бојама.

PLA филамент се обично истискује на око 190-220°C, са брзином штампе од 50-60 mm/s. Обично се препоручује отварање вентилатора у близини млазнице за истискивање како би се убрзало хлађење.

ABS+ материјал је генерално врло издржљив и чврст, благо флексибилан и прилично отпоран на топлоту. Има добра својства апсорпције удара и одлична пластична својства. Брзо се учвршћује, издржљив је и тешко се ломи, идеалан је за механичке делове.

ABS филамент се обично користи на температури око 210-250°C. Због карактеристике ABS материјала, ABS филамент се брзо хлади тако да 3Д штампачу треба загрејан слој за штампу (око 110 °C) за обраду ABS филамента, како би се спречило савијање или пуцање одштампаног предмета. ABS филамент је боље штампати у добро проветреном простору.

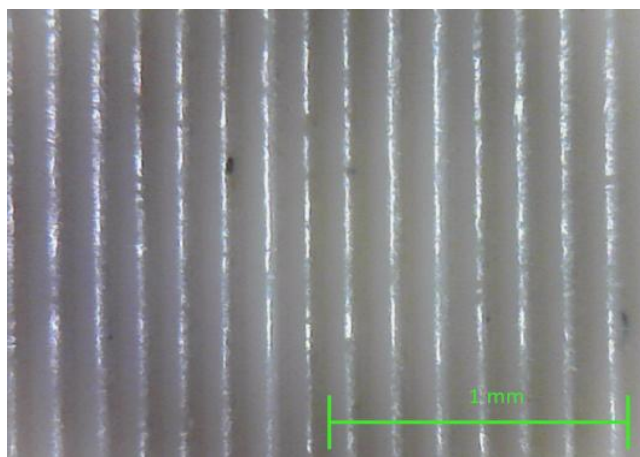
PETG филамент је близак PET филаменту. PETG је нова ажурирана верзија која има побољшана својста. Има минимално скупљање и савијање.

PETG филамент има добру савитљиву чврстоћу, већу од ABS филамента. Филамент је супер прозиран са сјајном завршном обрадом. PETG филамент је такође еколошки прихватљив и може се рециклирати. PETG је познат по својој транспарентности и јасноћи. Има велику хемијску отпорност са добром киселом и алкалном отпорношћу.

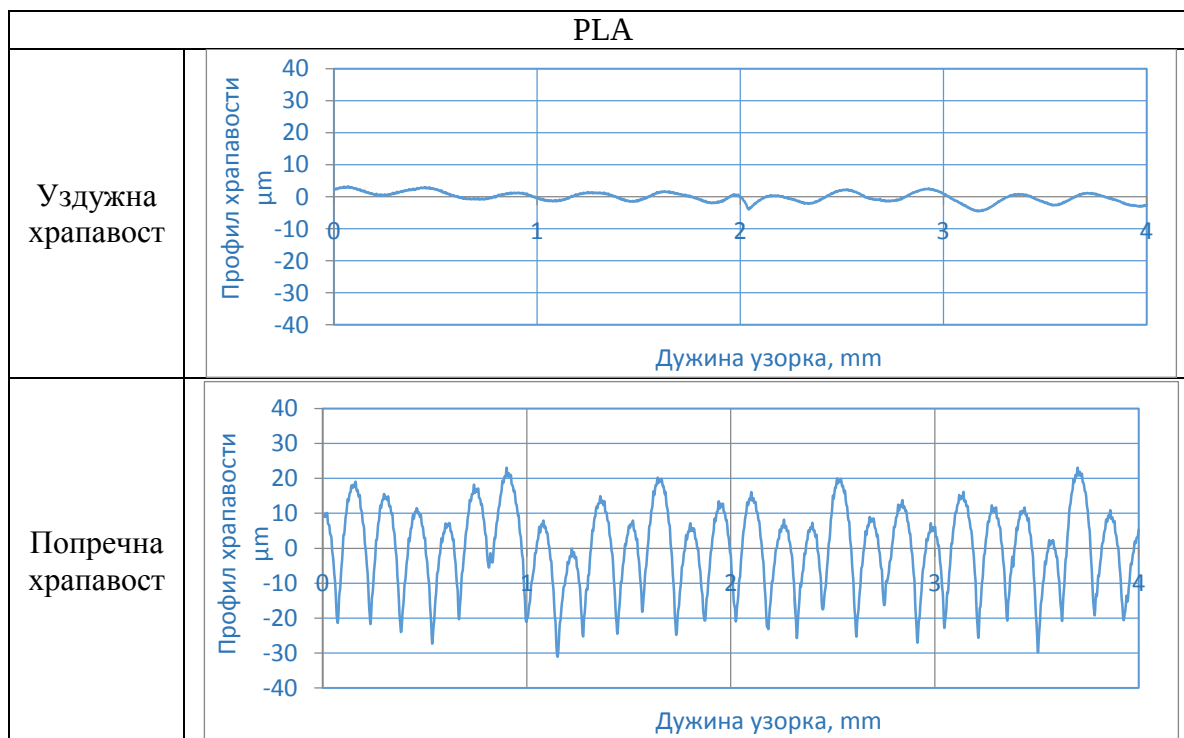
Идеална температура штампе је између 220°C – 250°C. Филамент се лако пријања, тако да се може штампати на акрилној, стакленој, полиамидној (Kapton) траци, плавој траци и на другим [28].

5.1 Резултати испитивања

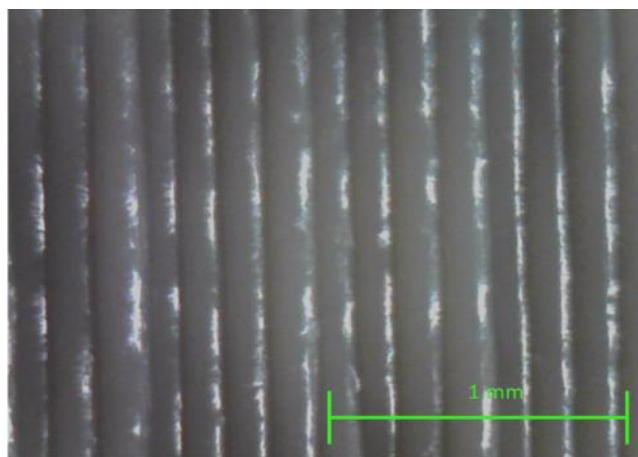
По завршетку израде узорака (од свих материјала) на 3Д штампачу, извршили смо мерење храпавости на средини површине (уз поновљено мерење). На слици 5.6 (а, б), 5.7 (а, б) и 5.8 (а, б) приказани су резултати параметра R_a , изглед добијене површине и профил површине.



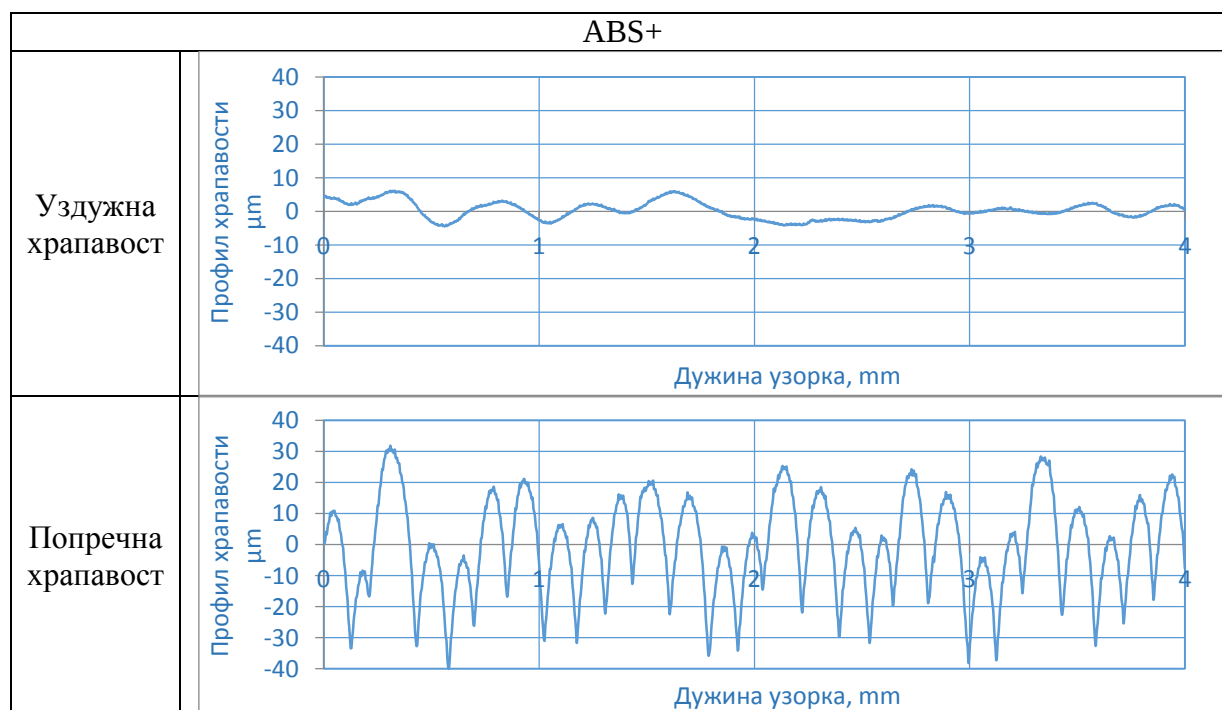
Слика 5.6а Површински профил узорка PLA



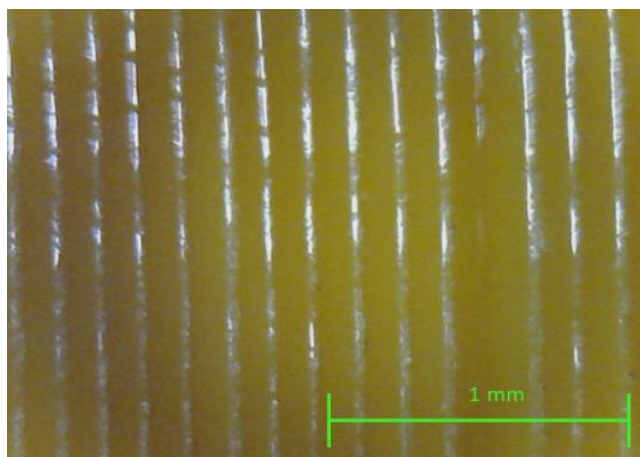
Слика 5.6б Резултати параметра R_a



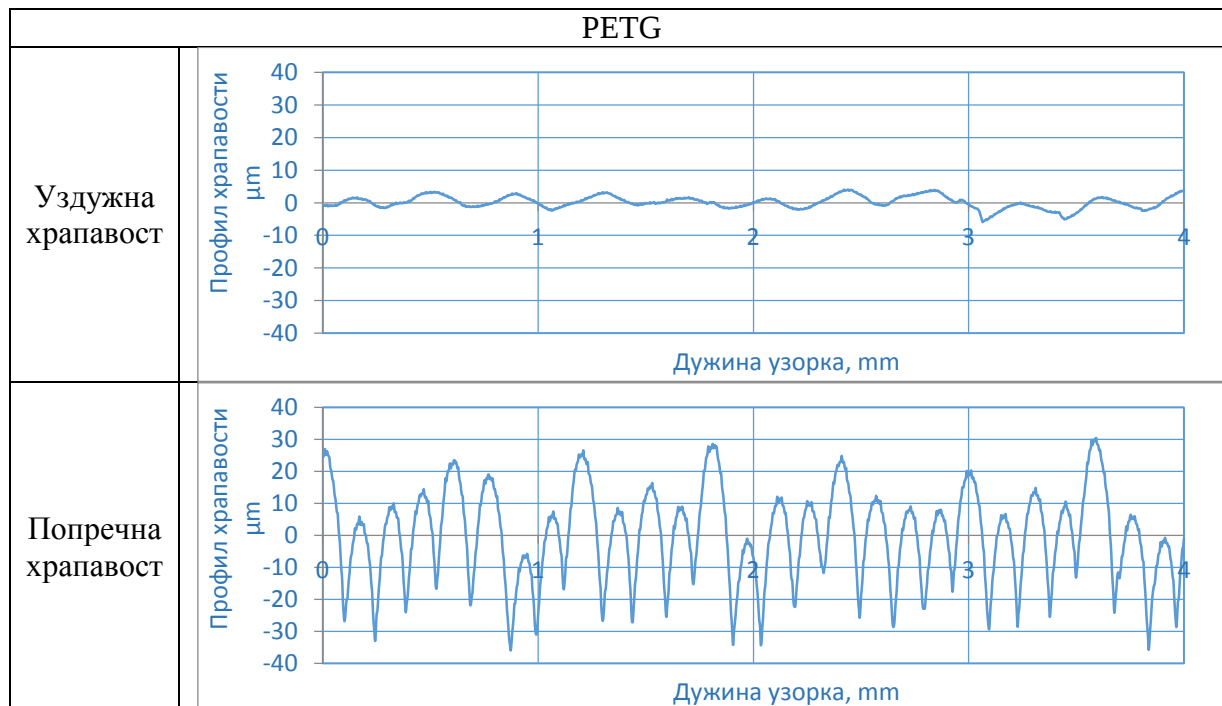
Слика 5.7а Површински профил узорка ABS+



Слика 5.7б Резултати параметра R_a

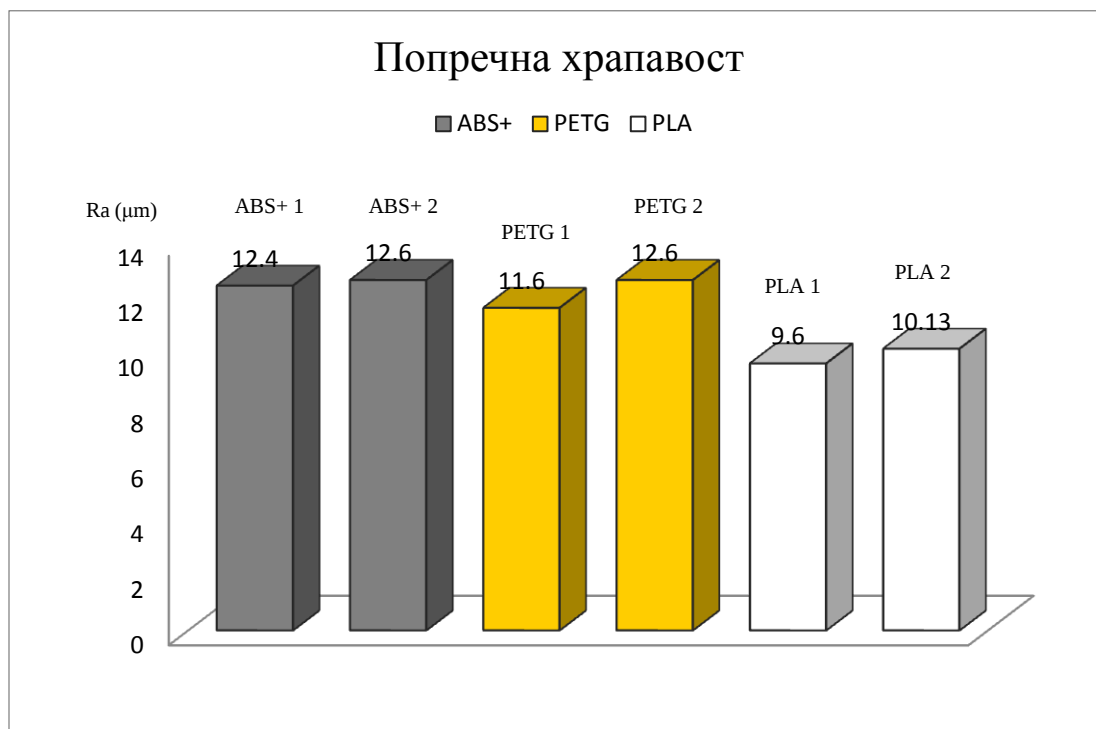


Слика 5.8а Површински профил узорка PETG

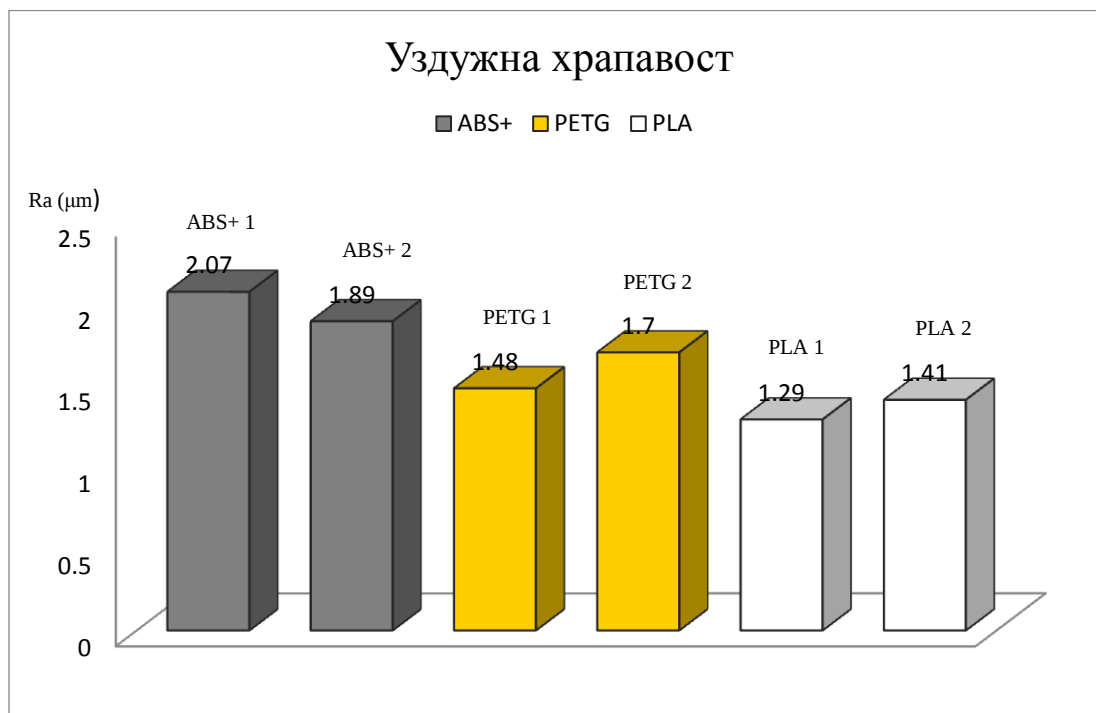


Слика 5.8б Резултати параметра R_a

На слици 5.9 и 5.10 приказан је хистограмски приказ са вредностима R_a свих узорака за попречну и уздужну храпавост.



Слика 5.9 Попречна храпавост



Слика 5.10 Уздужна храпавост

Анализом облика површина добијених 3Д штампањем, профила неравнина и вредности R_a , може се закључити да постоје разлике између узорак и да најмању храпавост имају узорци PLA материјала. Даље, може се приметити да у узорцима ABS+ и PETG материјала постоји неједнака расподела материјала са појавом локалног повећања и смањења висине неравнина.

При испитивању на трибометру задали смо различите параметре приказане у табели 11.

Табела 11. Задати параметри

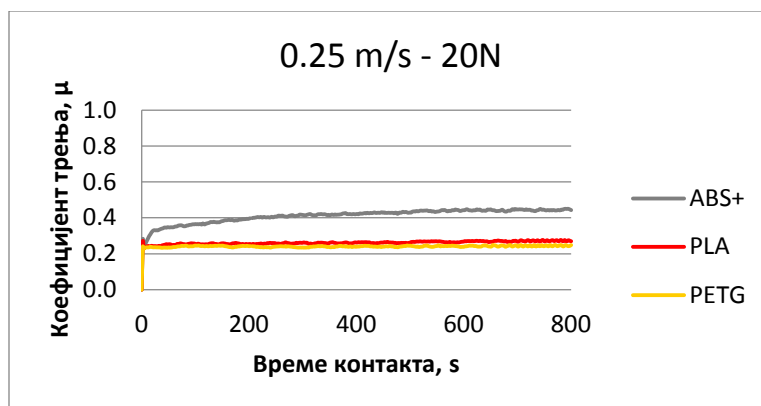
Материјал	0.25 m/s			0.75 m/s		
PLA	20 N	50 N	80 N	20 N	50 N	80 N
ABS+	20 N	50 N	80 N	20 N	50 N	80 N
PETG	20 N	50 N	80 N	20 N	50 N	80 N

Мерење триболошких својстава, коефицијента трења и хабања узорак извршено је на трибометру TPD-93 и резултати су приказани у табели 12.

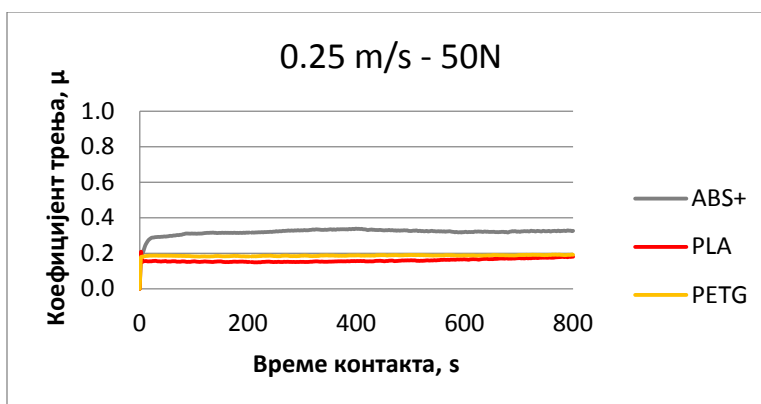
Табела 12. Резултати испитивања

Приказ средњих вредности коефицијента трења						
Нормално оптерећење	0.25 m/s (300-700 s)			0.75 m/s (100-250 s)		
	PLA	ABS+	PETG	PLA	ABS+	PETG
20 N	0.26	0.43	0.24	0.30	0.44	0.26
50 N	0.16	0.33	0.19	0.19	0.30	0.20
80 N	0.14	0.28	0.15	0.12	0.25	0.17

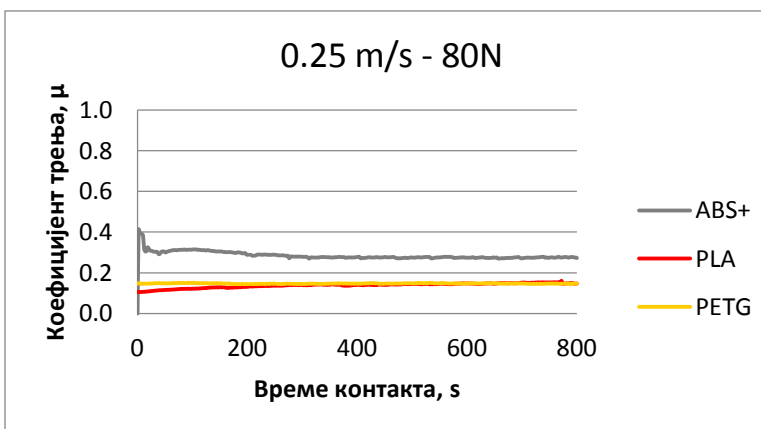
Током експеримента коефицијент је брзо достигао вредност која је била приближно константна. На слици 5.11 (а, б, ц) и 5.12 (а, б, ц) приказана је промена коефицијента трења током времена за сва три измерена материјала при брзини од 0.25 m/s и 0.75 m/s и са нормалним оптерећењем од 20 N, 50 N и 80 N.



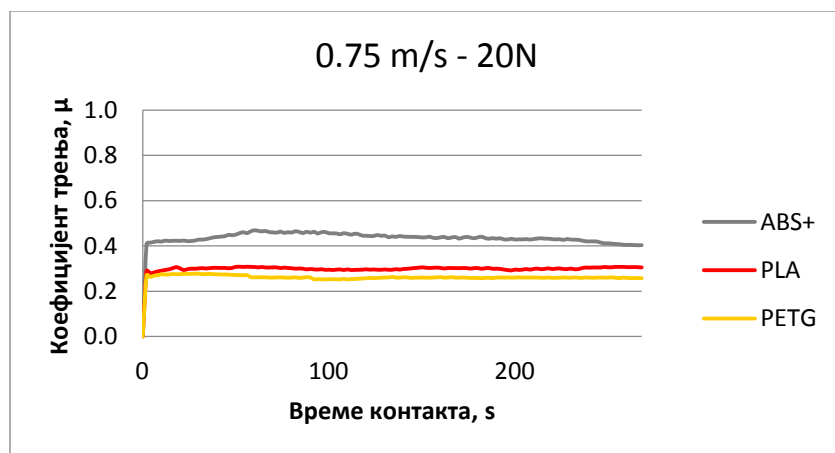
Слика 5.11а Промена коефицијента трења при параметрима 0.25 m/s - 20 N



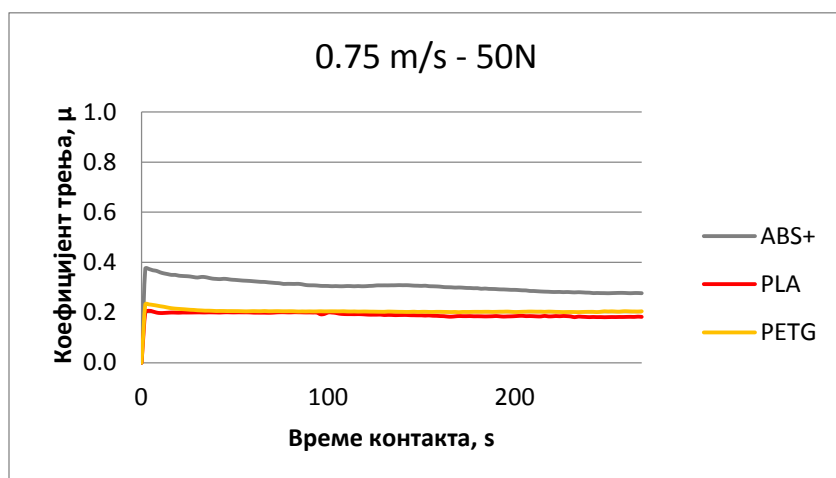
Слика 5.11б Промена коефицијента трења при параметрима 0.25 m/s - 50 N



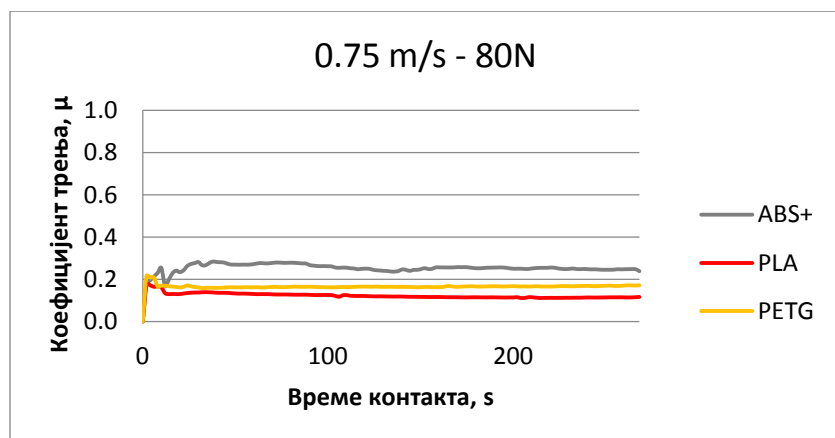
Слика 5.11ц Промена коефицијента трења при параметрима 0.25 m/s - 80 N



Слика 5.12а Промена коефицијента трења при параметрима
0.75 m/s - 20N

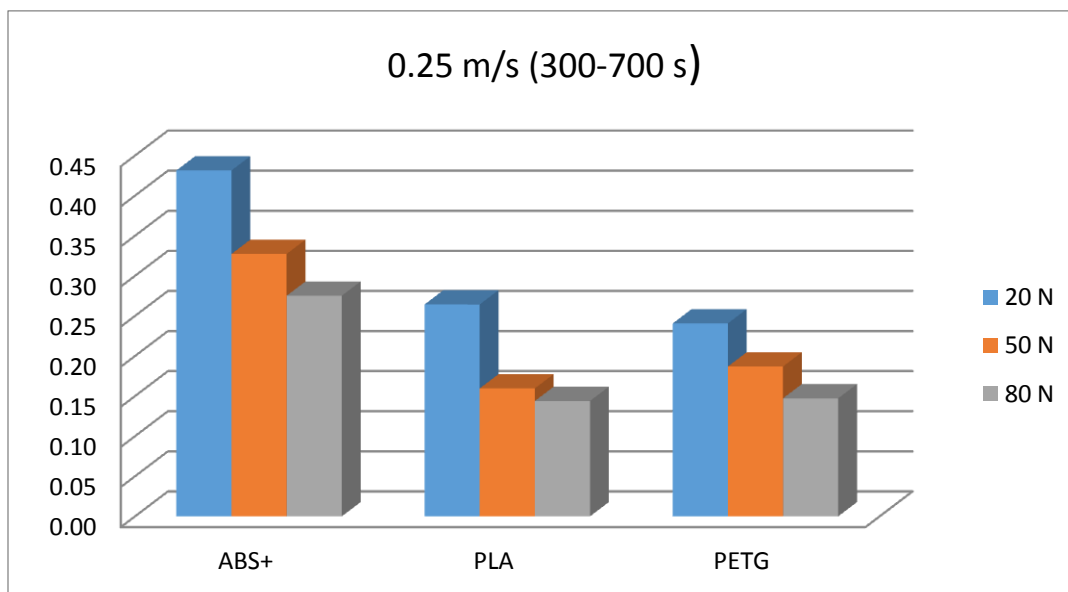


Слика 5.12б Промена коефицијента трења при параметрима
0.75 m/s - 50N

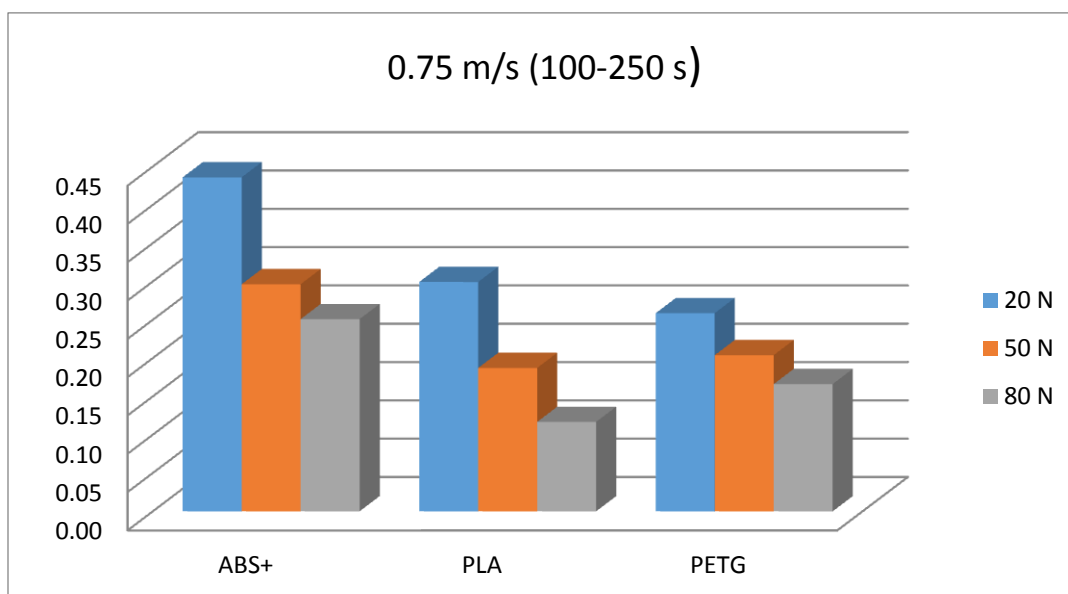


Слика 5.12ц Промена коефицијента трења при параметрима
0.75 m/s - 80N

На слици 5.13 и 5.14 су приказане вредности коефицијента трења у зависности од врсте материјала, брзине клизања и нормалног оптерећења. Може се закључити да са повећањем нормалног оптерећења у свим материјалима долази до значајног смањења коефицијента трења. Тај коефицијент готово да не зависи од брзине клизања. Највећи коефицијент трења има ABS+, док PETG има нешто већи коефицијент трења од PLA.

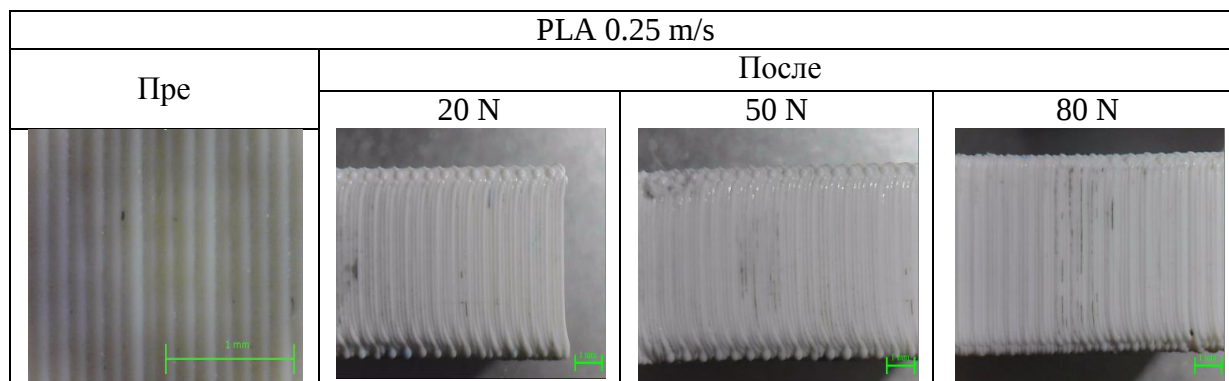


Слика 5.13 Вредности коефицијента трења при брзини клизања 0.25 m/s и времена трајања контакта (300-700 s)

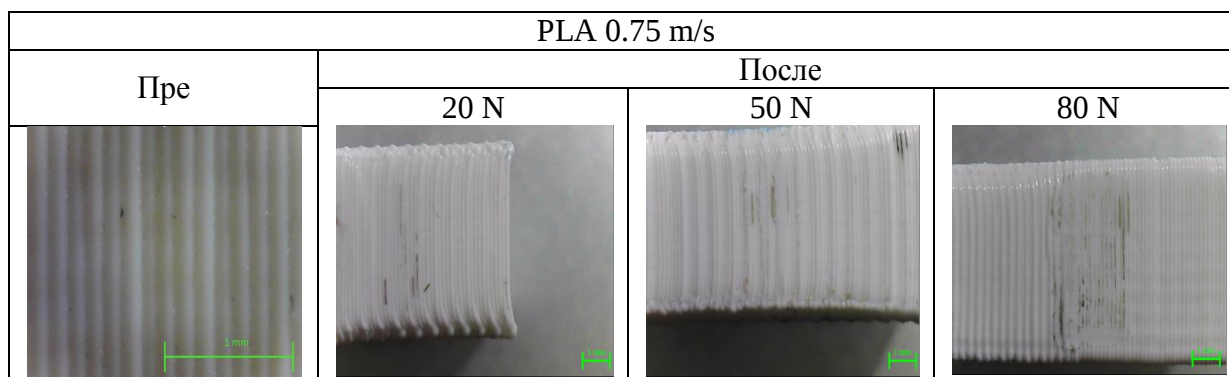


Слика 5.14 Вредности коефицијента трења при брзини клизања 0.75 m/s и времена трајања контакта (100-250 s)

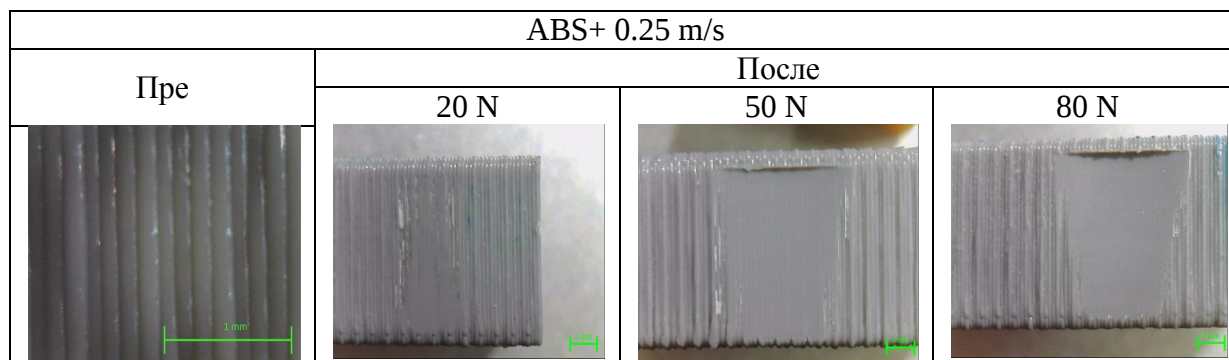
На крају испитивања измерене су топографије контактних површина испитиваних узорка и одређени одговарајући трагови хабања. Мерење ширине профила трага хабања је извршено на UIM-21 микроскопу. Мерењем ширине профила трага хабања дошло се до вредности ширине трага хабања који представља један од параметара за оцену отпорности на хабање испитиваних материјала (Табела 13.). Сlike 5.15 (а, б), 5.16 (а, б) и 5.17 (а, б) приказују истрошене површине испитиваних узорка за различите материјале и различита нормална оптерећења, испитивана брзином од 0.25 и 0.75 m/s.



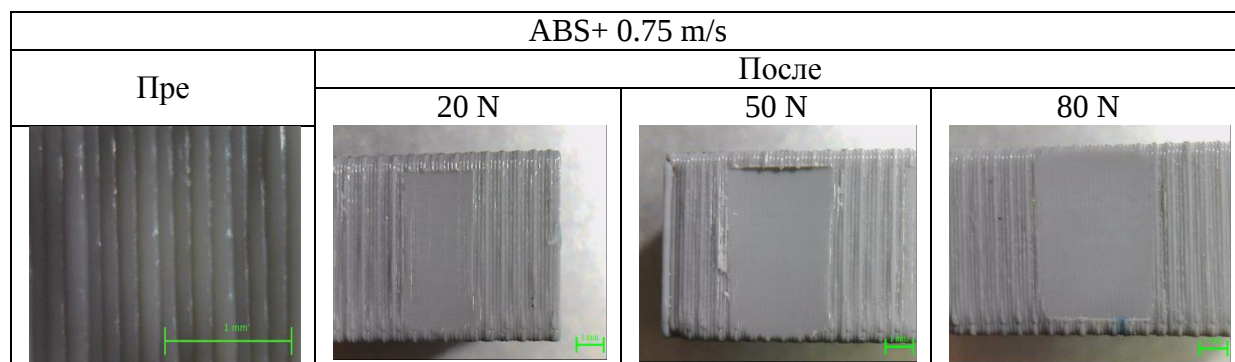
Слика 5.15а *Ширина трага хабања блокова након испитивања PLA при брзини 0.25 m/s*



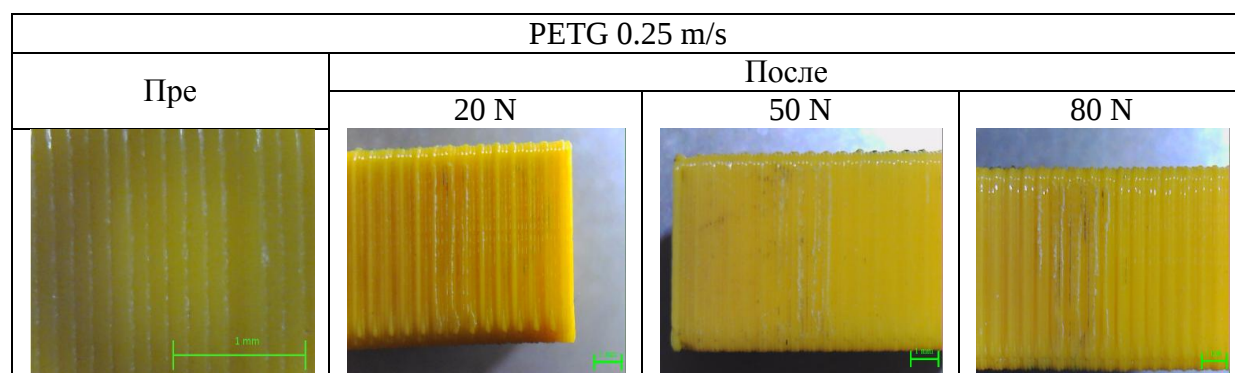
Слика 5.15б *Ширина трага хабања блокова након испитивања PLA при брзини 0.75 m/s*



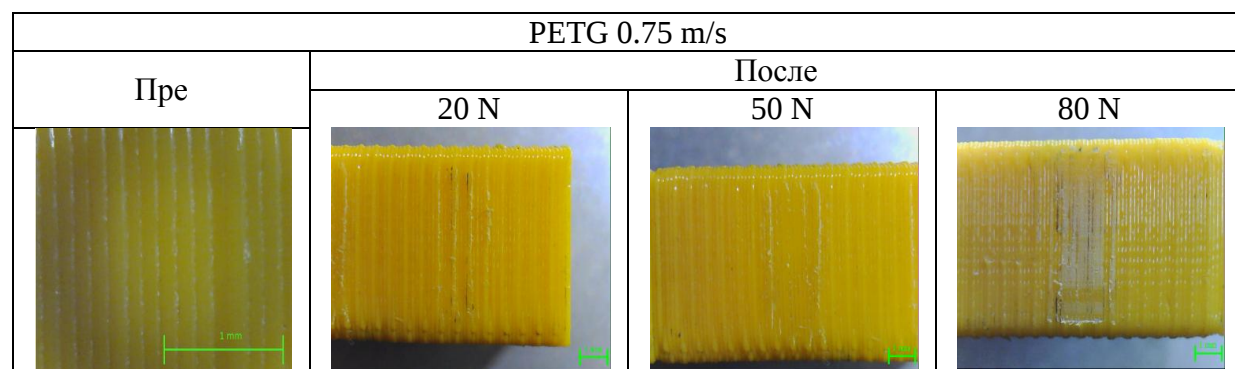
Слика 5.16а *Ширина трага хабања блокова након испитивања ABS+ при брзини 0.25 m/s*



Слика 5.16б *Ширина трага хабања блокова након испитивања ABS+ при брзини 0.75 m/s*



Слика 5.17а *Ширина трага хабања блокова након испитивања PETG при брзини 0.25 m/s*

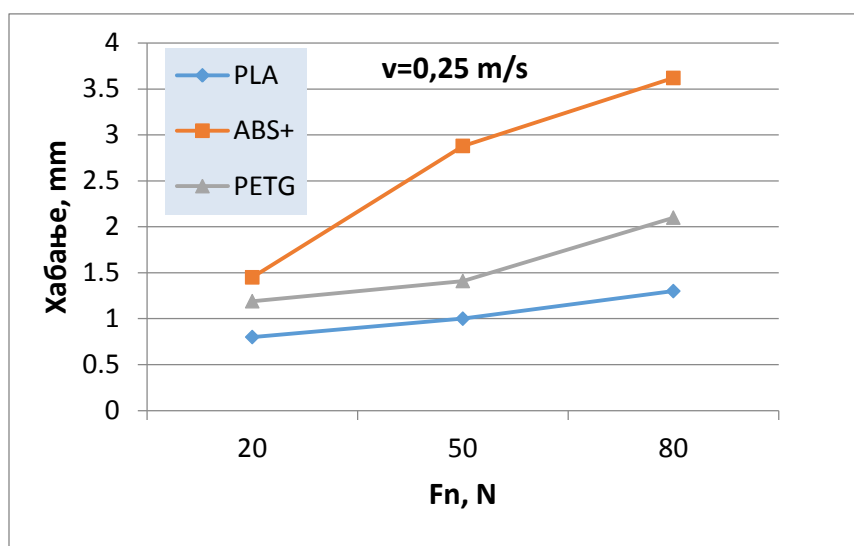
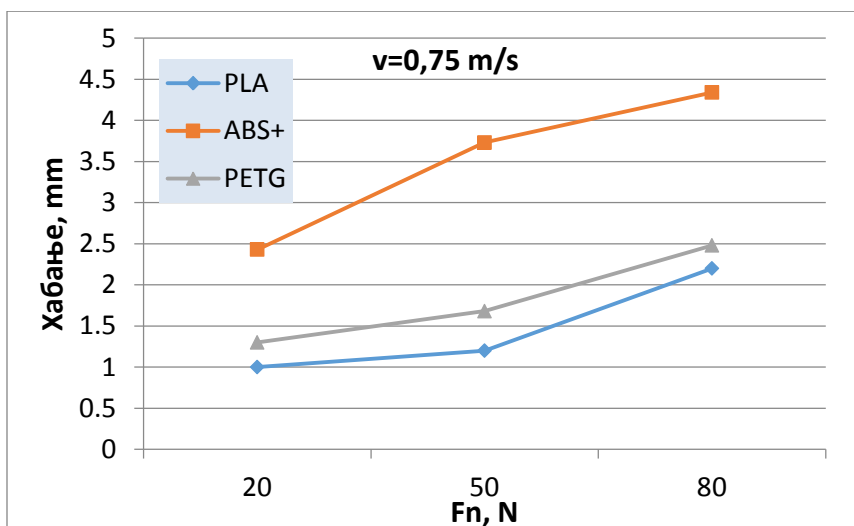


Слика 5.17б *Ширина трага хабања блокова након испитивања PETG при брзини 0.75 m/s*

Табела 13. Добијене вредности ширине трага хабања

Fn, N	v=0.25 m/s			v=0.75 m/s		
	PLA	ABS+	PETG	PLA	ABS+	PETG
20	0,8	1,45	1,19	1	2,43	1,3
50	1	2,88	1,41	1,2	3,73	1,68
80	1,3	3,62	2,1	2,2	4,34	2,48

На слици 5.18 и 5.19 приказане су зависности ширине трага хабања на испитиваним узорцима од нормалног оптерећења, брзине клизања и материјала. Може се видети да се хабање узорака повећава са повећањем оптерећења као и са повећањем брзине. Највеће хабање има ABS+, затим PETG и на крају PLA који има најмање хабање.

**Слика 5.18** Хабање узорака при брзини 0.25 m/s**Слика 5.19** Хабање узорака при брзини 0.75 m/s

6. Закључак

3Д штампа представља модерну технологију производње тродимензионалних објеката. У тродимензионалној штампи објекат се креира сукцесивним наношењем слојева материјала. 3Д штампа представља генерално брже, јефтиније и лакше решење од других технологија производње 3Д објеката. Омогућава израду макета делова и склопова од више различитих материјала, различитих механичких и физичких својстава у јединственом процесу. Ова технологија производи моделе који верно опонашају изглед, утисак и функционалност производа прототипа. У последњих неколико година 3Д штампачи су постали финансијски доступни малим и средњим предузећима, циме се израда прототипа помера из тешке индустрије и у канцеларијско окружење.

Сада је могуће и истовремено уклапање различитих врста материјала. Осим израде прототипова, 3Д штампачи нуде велики потенцијал за производњу различитих апликација у области производње накита, обуће, индустријског дизајна, архитектуре, аутомобилске индустрије, авио, стоматолошке и медицинске индустрије.

Захваљујући 3Д штампи већ данас се:

- скраћује време развоја производа уз снижавање трошкова;
- скраћује време доласка производа на тржиште;
- олакшава комуникација између функција у организацији (маркетинга, инжењерства, производње и продаје);
- одштампани функционални прототипови користе за анализу критичних елемената конструкције;
- врши тестирање функционалних прототипова пре израде алата за израду производа;
- прецизно дефинишу потребни алати за израду у производњи.

Генератори нове индустријске револуције, која је управо почела, су следећи:

- брзина израде - дигитални дизајн може брзо бити завршен или лако скинут са интернета, а начин израде је бржи и простији од традиционалног;
- локација набавке - штампачи у кући или сервису замениће читаве ланце добављача;
- доступност алата и делова;
- нови материјали за производњу – 3Д штампачи користе нове композитне материјале који су лакши и јачи од традиционалних;
- место производње - већина послова везаних за индустријску производњу ће се из хала преселити у канцеларије.

Анализа добијених резултата приликом испитивања триболошких карактеристика испитиваних материјала који се користе као филамент за 3Д штампу указује на то да постоје значајне разлике. То значи да одабир материјала за технологију 3Д штампе игра важну улогу са аспекта храпавости површине (топографије), трења и хабања и на то треба посебну обратити пажњу. Развој и примена триболошких материјала значајно доприноси проширењу подручја 3Д штампе и његовом интензивном развоју.

7. Литература

- [1] D. H. Freedman, *Layer By Layer*, Technology Review, Academic Search Premier 115.1 (2012) 50–53.
- [2] F. B. Prinz, R. Merz, L. Weiss, N. Ikawa, *Building Parts You Could Not Build Before*, Proceedings “8th International Conference on Production Engineering”, Hokkaido University, Sapporo, Japan 1997, 40-44.
- [3] Christopher D. Winnan, *3D Printing The next technology gold rush - Future Factories and How to Capitalize on Distributed Manufacturing*, SAD 2012.
- [4] Трајановић М., Грујовић Н., Миловановић Ј., Миливојевић В., *Рачунарски подржане брзе производне технологије*, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- [5] Ненад Грујовић, *Брза израда прототипова, Rapid Prototyping*, Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
- [6] Богдан Недић, *РП и РТ технологије (у рукопису)*, Машински факултет у Крагујевцу, 2005.
- [7] Andreas Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping-Rapid Tooling-Rapid Manufacturing*, Munich 2011.
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Inkjet_technology, приступљено 22.09.2020.
- [9] http://www.advantage3d.com/Detail_ProX950_Overview.php, приступљено 22.09.2020.
- [10] <https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-950>, приступљено 24.09.2020.
- [11] http://www.advantage3d.com/Detail_ProX950_Specs.php, приступљено 23.09.2020.
- [12] <https://www.spee3d.com/product/lightspee3d/>, приступљено 03.10.2020
- [13] <https://www.engineering.com/CAM/ArticleID/12061/EOS-P-396.aspx>, приступљено 01.10.2020.
- [14] <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/eos-polymer-systems>, приступљено 04.10.2020.
- [15] https://www.bibuschina.cn/fileadmin/product_data/categories/e-manufacturing/eos_formiga_p_100_datasheet_en.pdf, приступљено 27.09.2020.
- [16] https://www.bibuschina.cn/fileadmin/product_data/categories/e-manufacturing/eos_formiga_p_100_datasheet_en.pdf, приступљено 03.10.2020

- [17] <https://www.slideserve.com/iorwen/i-d-en-el-cnm-imb-para-futuros-aceleradores>, приступљено 27.09.2020.
- [18] <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-400>, приступљено 23.09.2020.
- [19] <https://www.treatstock.com/machines/item/260-eos-m-400>, приступљено 23.09.2020
- [20] <http://www.fsggcdnc.com/u/cms/www/201501/04213811q564.pdf>, приступљено 29.09.2020.
- [21] <http://www.protocom3dp.com/projet-7000-hd>, приступљено 22.09.2020.
- [22] <https://3dprinting.com/products/industrial-3d-printer/carbon-m2/>, приступљено 28.09.2020.
- [23] <https://all3dp.com/1/carbon-m2-review-specs/>, приступљено 24.09.2020.
- [24] <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/#:~:text=Material%20suitability,to%20activate%20the%20adhesive%20layer>, приступљено 23.09.2020
- [25] <https://runrepeat.com/adidas-futurecraft-4d>, приступљено 23.09.2020.
- [26] <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2007/281-288.pdf>, приступљено 27.09.2020.
- [27] <https://www.3dprima.com/3d-printers/wanhao-duplicator-i3-plus-mark-2-printer/a-22848/>, приступљено 06.10.2020.
- [28] <http://pesjournal.net/journal/v1-n1/13.pdf>, приступљено 04.10.2020.