

MEHANIČKA SVOJSTVA FLEKSIBILNIH MATERIJALA IZRAĐENIH ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM

Vojnović, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:644520>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

Bruno Vojnović

**MEHANIČKA SVOJSTVA FLEKSIBILNIH
MATERIJALA IZRAĐENIH
ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2024.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

Bruno Vojnović

**MEHANIČKA SVOJSTVA FLEKSIBILNIH
MATERIJALA IZRAĐENIH
ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Tihana Kostadin

Profesor stručnog studija

Karlovac, 2024.



ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

* Ime i prezime	BRUNO VOJNOVIĆ	
OIB / JMBG		---
Adresa		
Matični broj studenta	0110618010	
JMBAG	0248070657	
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	X prediplomski	specijalistički diplomski
Naziv studija	STRUČNI PRJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA	
Godina upisa	2018.	
Datum podnošenja molbe	15.02.2024.	
Vlastoručni potpis studenta/studentice		

* Naslov teme na hrvatskom: MEHANIČKA SVOJSTVA FLEKSIBILNIH MATERIJALA IZRAĐENIH ADITIVNOM TEHNOLOGIJOM

* Naslov teme na engleskom: MECHANICAL PROPERTIES OF FLEXIBLE MATERIALS MANUFACTURED BY AM TECHNOLOGIES

Opis zadatka:

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. Uvodno obraditi kratko povijest aditivnih tehnologija. U teorijskom dijelu opisati aditivne tehnologije, vrste i materijale. U praktičnom dijelu opisati mehanička svojstva sluznice čovjeka. Zatim navesti fleksibilne materijale za postupke aditivne tehnologije. Izraditi probne uzorke i ispitati mehanička svojstva odabranih fleksibilnih materijala. Na kraju napisati analizu i zaključak. Rad urediti prema uputama za pisanje završnog rada na strojarском odjelu, kako je objavljeno na web stranicama Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

NAPOMENA: Obrazac je poželjno ispuniti elektronski. Ukoliko isti niste u mogućnosti ispuniti elektronski, podatke označene* obvezno popuniti čitko velikim tiskanim slovima

IZJAVA

Izjavljujem da je završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuje korištene bilješke.

Također, da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno nije prepisan iz necitiranog rada te niti jedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Isto tako, izjavljujem kako dijelovi rada nisu iskorišteni za bilo koji drugi rad, u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi. Ovim putem bi se zahvalio svojoj mentorici dr.sc. Tihani Kostadin za stručnu pomoć i vođenju skroz završni rad te dr.sc. Nikoli Šimunić, kod eksperimentalnog dijela u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu.

SAŽETAK

Aditivna tehnologija (proizvodnja) je još uvijek relativno nova vrsta tehnologije koju karakteriziraju trodimenzionalni modeli koji nastaju sloj po sloj, gdje se svaki sljedeći sloj veže na prethodni sloj. Trodimenzionalni modeli se konstruiraju putem CAD/CAM programskih sustava. Postupci aditivne proizvodnje omogućuje lakšu, jeftiniju i snažniju izradu dijelova.

Uvodno poglavlje tumači podjelu rada na teorijski i eksperimentalni dio te temu završnog rada.

Drugo poglavlje opisuje povijest i slijed razvoja aditivne tehnologije i njezinih postupaka. Treće poglavlje opisuje općeniti dio aditivne proizvodnje te opisuje tijek izrade modela, a kasnije opisuje postupke aditivne tehnologije i materijale koji se koriste u aditivnoj proizvodnji.

Četvrto poglavlje opisuje ljudsku sluznicu (dijelove usnog otvora, zube i sl.), fleksibilne materijale koji se koriste u ispitivanju vlačne čvrstoće, oprema koja se koristi za izradu testnih epruveta te oprema za ispitivanje vlačne čvrstoće i tvrdoće.

U petom poglavlju se nalazi analiza rezultata dobivenih ispitivanjem te usporedba dobivenih rezultata sa mehaničkim svojstvima dijelova usnog otvora.

U šestom poglavlju je zaključak završnog rada.

Ključne riječi: aditivna tehnologija (proizvodnja), 3D pisari, ljudska sluznica, fleksibilni materijali, mehanička svojstva

SUMMARY

Mechanical properties of flexible materials manufactured by AM technologies

Additive technology (production) is still a relatively new kind of technology which characterizes a three-dimensional model which is created layer by layer, where every other layer connects to the previous layer. Three-dimensional models are constructed by CAD/CAM software systems. Processes of additive production have enabled us easier, low-cost and stronger part production.

First or introduction chapter about division of the final thesis on theoretical and experimental part but also topic of this final thesis.

Second chapter describes history and sequence of development of additive technology and its processes.

Third chapter describes basics of additive technology (production), describes production process of part, later it describes processes of additive production and materials which they are used in process.

Fourth chapter describes human mucosa, flexible materials which are used in tensile strength test and it also describes equipment which we have used in this thesis.

In fifth chapter there are results analysis and comparison between test results and mechanical properties of human mucosa.

Sixth chapter is conclusion of this thesis.

Key words: additive technology (production), 3D printers, human mucosa, flexible materials, mechanical properties

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	1
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA.....	5
1. UVOD.....	6
2. POVIJEST ADITIVNE TEHNOLOGIJE.....	7
3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA.....	10
3.1 Osnovni princip aditivne tehnologije.....	10
3.1.1 Prva faza.....	11
3.1.2 Druga faza.....	13
3.1.3 Treća faza.....	13
3.1.4 Četvrta faza.....	13
3.1.5 Peta faza.....	13
3.1.6 Šesta faza.....	13
3.1.7 Sedma faza.....	14
3.1.8 Osmo faza.....	14
3.2 Vrste aditivne tehnologije	14
3.2.1 SLA	15
3.2.1.1 Princip rada SLA	16
3.2.2 SLS.....	17
3.2.2.1 Princip rada SLS	18
3.2.3 3D tiskanje	19
3.2.3.1 Princip rada postupkom 3D tiskanja	20
3.2.4 LLM	21
3.2.4.1 Princip rada LLM-a.....	22
3.2.5 FDM	22
3.2.5.1 Princip rada FDM-a	23
3.2.6 SLM.....	24
3.2.6.1 Princip rada SLM-a.....	25
3.3 Materijali u AM.....	25
3.3.1 Polimeri.....	26
3.3.1.1 Plastomeri.....	26
3.3.1.2 Elastomeri.....	27
3.3.1.3 Duromeri.....	27
3.3.2 Keramika.....	27

3.3.3 Metali.....	27
4.0 PRAKTIČNI DIO	28
4.1 Ljudska sluznica i usna šupljina.....	28
4.1.1 Obraz	29
4.1.2 Zubi.....	30
4.1.2.1 Dijelovi zuba.....	31
4.1.2.2 Građa zuba.....	31
4.1.2.3 Zubno meso.....	32
4.2 Fleksibilni materijali.....	33
4.2.1 Mehanička svojstva fleksibilnih materijala.....	33
4.2.2 Podjela fleksibilnih materijala u FDM-u.....	36
4.2.2.1 Termoplastični poliuretan (TPU).....	36
4.2.2.2 Meki PLA	36
4.2.2.3 Termoplastični poliamid (TPA).....	37
4.2.2.4 Polietar blok amid (PEBA).....	37
4.2.2.5 Termoplastični ko-poliester (TPC).....	37
4.2.2.6 Termoplastični elastomer (TPE).....	37
4.3 Korišteni materijal	38
4.3.1 Fillamentum Flexfill TPE 90A.....	38
4.3.2 Recreus Filaflex SEBS.....	39
4.3.3 Plastika Trček TPU Flex 89A	40
4.3.4 Recreus Filaflex 82A.....	40
4.3.5 Recreus Filaflex 70A.....	41
4.4 Korištena oprema.....	42
4.4.1 Uređaj za 3D ispis Prusa i3MK3S+.....	42
4.4.2 Kidalica Shimadzu AG-X plus-100kN.....	43
4.4.3 Uređaj za ispitivanje tvrdoće Zorn Stendal DDR.....	44
4.5 Uzorci za ispitivanje.....	45
4.6 Ispitivanje vlačne čvrstoće.....	50
4.6.1 Rezultati ispitivanja - TPE 90A.....	52
4.6.2 Rezultati ispitivanja – SEBS.....	54
4.6.3 Rezultati ispitivanja – TPU 89A.....	56
4.6.4 Rezultati ispitivanja – TPU 82A.....	56
4.6.5 Rezultati ispitivanja – TPU 70A.....	61

4.7 Rezultati ispitivanja tvrdoće po Shoreovoj metodi.....	62
5.0 ANALIZA REZULTATA.....	63
6.0 ZAKLJUČAK.....	67
LITERATURA.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba izrade modela pomoću obrade odvajanjem čestica (lijevo) i izrada predmeta aditivnim postupkom (desno).....	11
Slika 2. Faze proizvodnje aditivnom tehnologijom [4].....	11
Slika 3. Prikaz sučelje programa SolidWorks.....	12
Slika 4. HandySCAN 3D skener.....	12
Slika 5. Postupci aditivne proizvodnje.....	15
Slika 6. Shematski prikaz uređaja za SLA [22].....	16
Slika 7. Shematski prikaz uređaja za SLS [23].....	18
Slika 8. Shematski prikaz uređaja za 3D tiskanje [4].....	20
Slika 9. Shematski prikaz uređaja za LLM [24].....	21
Slika 10. Shematski prikaz uređaja za FDM [25].....	23
Slika 11. Shematski prikaz uređaja za SLM [26].....	24
Slika 12. Udio materijala u aditivnoj proizvodnji [1].....	26
Slika 13. Usna šupljina [19].....	30
Slika 14. Građa zuba [20].....	31
Slika 15. Zubno meso [21].....	32
Slika 16. Podjela gume prema tvrdoći [6].....	38
Slika 17. Prusa MK3S+ [12].....	43
Slika 18. Kidalica SHIMADZU AG-X.....	44
Slika 19. Uređaj za ispitivanje tvrdoće Zorn Stendal DDR.....	45
Slika 20. Dimenzije epruveta za ISO 37 [15].....	46
Slika 21. Dimenzije testnih uzoraka za ispitivanje tvrdoće.....	47
Slika 22. Izrada epruvete u početnoj fazi.....	48

Slika 23. Izrađena epruveta.....	49
Slika 24. Primjer pripreme epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće.....	50
Slika 25. Epruvete od TPE 90A nakon provedenog ispitivanja.....	52
Slika 26. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 1.....	52
Slika 27. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 2.....	52
Slika 28. Epruvete od SEBS nakon provedenog ispitivanja.....	54
Slika 29. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 1.....	54
Slika 30. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 2.....	54
Slika 31. Epruvete od TPU 89A nakon provedenog ispitivanja.....	56
Slika 32. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 1.....	56
Slika 33. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 2.....	56
Slika 34. Epruvete od TPU 82A nakon provedenog ispitivanja.....	58
Slika 35. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 1.....	58
Slika 36. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 2.....	58
Slika 37. Epruvete od TPU 70A nakon provedenog ispitivanja.....	60
Slika 38. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 1.....	60
Slika 39. Dijagram sila / produljenje za eprvetu 2.....	60
Slika 40. Pripremljeni uzorci za ispitivanje tvrdoće.....	62
Slika 41. Dijagram sila / produljenje za TPE 90A.....	63
Slika 42. Dijagram sila / produljenje za SEBS.....	64
Slika 43. Dijagram sila / produljenje za TPU 89A.....	64
Slika 44. Dijagram sila / produljenje za TPU 82A.....	65
Slika 45. Dijagram sila / produljenje za TPU 70A.....	65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Postavke za 3D ispis.....	48
Tablica 2. Mehanička svojstva	53
Tablica 3. Mehanička svojstva	55
Tablica 4. Mehanička svojstva	57
Tablica 5. Mehanička svojstva	59
Tablica 6. Mehanička svojstva	61
Tablica 7. Rezultati ispitivanja.....	62
Tablica 8. Mehanička svojstva ljudske sluznice[17].....	66
Tablica 9. Mehanička svojstva korištenih materijala ispitani od strane proizvođača.....	67

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
2D	Dvodimenzionalno
3D	Trodimenzionalno
AM	Additive Manufacturing – Aditivna proizvodnja
ASTM	American Society for Testing and Materials
RM	Rapid Manufacturing – Brza proizvodnja
MIT	Massachusetts Institute of Tehnology
CAD	Computer Aided Design- Dizajniranje pomoću računala
CAM	Computer Aided Manufacturing – Proizvodnja pomoću računala
SLA	Stereolithography - Stereolitografija
SLS	Selective Laser Sintering- Selektivno lasersko srašćivanje
LLM	Layer Laminate Manufacturing- Laminiranje
FDM	Fused Deposition Modeling - Taložno očvršćivanje
SLM	Selective Laser Melting – Selektivno lasersko taljenje
UV	Ultraviolet - Utraljubičasto
TPU	Termoplastični poliuretan
PLA	Polilaktična kiselina
TPA	Termoplastični poliamid
PEBA	Polieter blok amid
TPC	Termoplastični kopoliester
TPE	Termoplastični elastomer
SEBS	Stiren Etilen Butilen Stiren
ISO	International Organization for Standardization

POPIS FIZIKALNIH VELIČINA I NJIHOVIH MJERNIH JEDINICA

Fizikalna veličina	Oznaka	Mjerna jedinica
Vlačna čvrstoća	R_m	N/mm ²
Maksimalna sila opterećenja	F_m	N
Površina početnog poprečnog presjeka	S_0	mm ²
Granica loma	R_k	N/mm ²
Konačna sila	F_k	N
Istezanje	ϵ	mm/mm
Istezljivost	A	%
Produljenje	ΔL_u	mm
Početna duljina epruvete	L_0	mm
Modul elastičnosti	E	N/mm ²
Granica razvlačenja	R_e	N/mm ²
Konvencionalna (dogovorena) granica razvlačenja	$R_{p0,2}$	N/mm ²

1. UVOD

Završni rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela, a na početku rada je sažeti povijesni prikaz aditivne proizvodnje.

U teorijskom dijelu opisana je aditivna proizvodnja, vrste aditivne proizvodnje i opće materijale koji se koriste za proizvodnju.

U eksperimentalnom dijelu opisana su mehanička svojstva sluznice čovjeka, navedeni fleksibilni materijali za postupke aditivne tehnologije, a također u radu se nalaze rezultati ispitivanja mehaničkih svojstva odabranih fleksibilnih materijala. Na kraju završnog rada je napisana analiza dobivenih mehaničkih svojstva od strane studenta sa mehaničkim svojstvima usne šupljine te usporedba dobivenih mehaničkih svojstvima od strane studenta sa propisanim mehaničkim svojstva od strane tvrtke koja prodaje fleksibilne materijale. Na kraju završnog rada nalazi se zaključak rada.

Cilj završnog rada je usporediti mehanička svojstva fleksibilnih materijala koji se upotrebljavaju u FDM postupku sa mehaničkim svojstvima usne šupljine te iz toga utvrditi da li ti isti materijali mogu zamijeniti dijelove usne šupljine koji su navedeni u tablici 8.

2. POVIJEST ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Aditivna proizvodnja se prvi puta spominje 60-tih godina 20. stoljeća u institutu „Battle Memorial“ , u Columbusu, u gradu koji se nalazi u saveznoj državi Ohio u SAD-u. Iz navedenog instituta potječu prvi pokušaji stvaranja čvrstih elemenata koristeći fotopolimere i laserske tehnologije. Eksperimentom se prikazuje posuda punjena smolom kojom se pokušalo polimerizirati materijal na mjestu sjecišta dviju laserskih zraka. Smola koja se tada koristila u eksperimentu, izumila je tvrtka DuPont 50-tih godina prošlog stoljeća, koja se i danas bavi proizvodnjom smole i istraživanjem. [1]

Wyn Kelly Swainson je 1967. godine prijavio patent pod nazivom „Metoda proizvodnje trodimenzionalnih figura holografijom“ (eng. „Method of Producing a Three-Dimensional Figure by Holography“). Eksperimentalnim putem pokušao je primijeniti postupak s dvostrukom laserskom zrakom, ali nikada nije uspio razviti održiv sustav. [2]

Tvrtka Dynell Electronics Corp kasnih 70-tih godina 20 stoljeća registrirala niz patenata vezano uz čvrstu fotografiju. Radilo se o rezanju poprečnih presjeka modela putem računalne kontrole, glodalice ili lasera te pohranjivanje presjeka u isti registar kako bi se stvorio 3D model. [2]

Hideo Kodama iz Općinskog instituta za industrijsko istraživanje Nagoya (Japan) je 1980. godine izmislio jednozračno lasersko stvrđivanje. Hideo Kodama je patent prijavio u svibnju, no rok je istekao prije nego što su rad preuzeli na pregled. Kasnije iste godine objavljuje rad, gdje objašnjava aditivne metode za izradu 3D plastičnih modela sa fotootvrđujućim termoreaktivnim polimerom. Područje je izloženo UV zračenjem, a kontrolira se crno-bijelim filmom ili odašiljačem za skeniranje optičkih vlakana. [2]

Alan Herbert iz 3M laboratorija je 1982.godine objavio rad pod imenom „Generiranje krutih objekata“ (eng. „Solid Object Generation“) u časopisu „Journal of Applied Photographic Engineering“. Herbert u svome radu opisuje sustav koji uz pomoć usmjeravanjem laserske argonske zrake na površinu fotopolimera pomoću zrcalnog sustava povezanog sa x-y ploterom dobije krutu površinu. Pomoću takvog sustava uspio je stvoriti nekoliko krutih predmeta, ali jednostavnih. [1]

Jean Claude Andre je u srpnju 1984. godina u suradnji s francuskim Nacionalnim centrom za znanstveni rad (eng. „National Center for Scientific Research“) u Nancyju u Francuskoj, zajedno sa kolegama iz Francuske tvrtke „Cilas Alcatel Laser Company“, prijavio patent pod imenom „Uređaji za izradu modela industrijskog dijela“ (eng. „Apparatus for Fabricating a Model of an Industrial Part“). [2]

Američka tvrtka „3D Systems“ je 1987. godine počela razvijati proces koji se zove „stereolitografija“ te time započinje i razvijanje postupaka aditivne proizvodnje. Stereolitografija je postupak prilikom kojeg se ultraljubičastim zračenjem putem lasera očvršćuju fotopolimeri unutar tankih slojeva predmeta. [1]

1992. godine na tržištu se pojavljuje SLS ili selektivno lasersko srašćivanje (eng. „Selective Laser Sintering“), gdje se iskazuju dvije tvrtke američka tvrtka DTM („Desk Top Manufacturing“) i japanska tvrtka Teijin Seiki. [2]

Američko – izraelska tvrtka Stratasys 1996. godine predstavila je svoj uređaj Genysis. Radi se o uređaju koji je radio prema načelima FDM-ovog (“Fused Deposition Modeling“) postupka. [2]

Tvrtka AeroMet osnovana je 1997.godine te iste godine razvija sustav, koji koristi laser velike snage, koji očvršćuje dodane čestice materijala koje se koriste za izradu proizvoda od legure titana. Tvrtka AeroMet je proizvodila dijelove za zrakoplovnu industriju sve do prosinca 2005. godine kada su napustili projekt. [3]

Tvrtka Object Geometris je 2004. godine predstavila je liniju neprozirnih obojanih materijala pod imenom VeroFullCure800. Materijali su omogućili postizanje boljih mehaničkih svojstva te omogućili kvalitetniji prikaz detalja na proizvodu. Tvrtka 3D systems je pustila u prodaju InVisionHR uređaj koji je niske razlučivosti i specijaliziran za draguljarstvo. [2]

2009. godine pojam „aditivna proizvodnja“ postaje definirani znanstveni termin od međunarodne komisije ASTM (eng. „American Society for Testing and Materials“) . [2]

Tvrtka Materialise je u ožujku 2013. godine predstavila servis HeatPrint, gdje se aditivnim metodama proizvode specifični kardiovaskularni modeli po mjeri. Prije operativnih zahvata modeli se koriste, te služe za upoznavanje anatomije i za testiranje alata.

3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA

Aditivna proizvodnja (eng. Additive Manufacturing - AM) ili aditivna tehnologija spada u granu proizvodnog strojarstva, a bavi se izradom modela nanošenjem tankog sloja čestica materijala, po principu "sloj" na "sloj" .

Materijal može biti : plastika, guma, beton, a možda uskoro i materijal koji može zamijeniti ljudsko tkivo.

Aditivna tehnologija primjenjuje se u različitim granama industrije kao što su:

- automobilska,
- zrakoplovna,
- arhitektura,
- medicina,
- elektrotehnika,
- proizvodi široke primjene.

3.1 Osnovni princip aditivne tehnologije

Proizvod izrađen aditivnom tehnologijom, izrađuje se po principu dodavanje čestica materijala po principu „sloj“ po „sloj“ , točnije svaki sljedeći sloj dolazi na vrh prijašnjeg sloja. Izrada predmeta se vrši vertikalno prema gore. Osnovno načelo aditivne tehnologije je sasvim suprotno od konvencionalnih postupaka obrade. Kod konvencionalnih postupaka obrade do gotovog dijela ili izratka dolazimo s oduzimanjem materijala, a kod aditivne proizvodnje dodavanjem materijala, prikazano na slici 1. [1]

Najčešći konvencionalni postupci obrade :

- tokarenje,
- glodanje,
- brušenje.



Slika 1. Usporedba izrade modela pomoću obrade odvajanjem čestica (lijevo) i izrada predmeta aditivnim postupkom (desno) [1]

Prilikom izrade proizvoda ili prototipa aditivnom tehnologijom, taj proizvod ili prototip prolazi kroz nekoliko osnovnih faza AM tehnologije. Osnovne faze AM tehnologije su prikazane na slici 2., a faze su opisane su u sljedećim poglavljima.



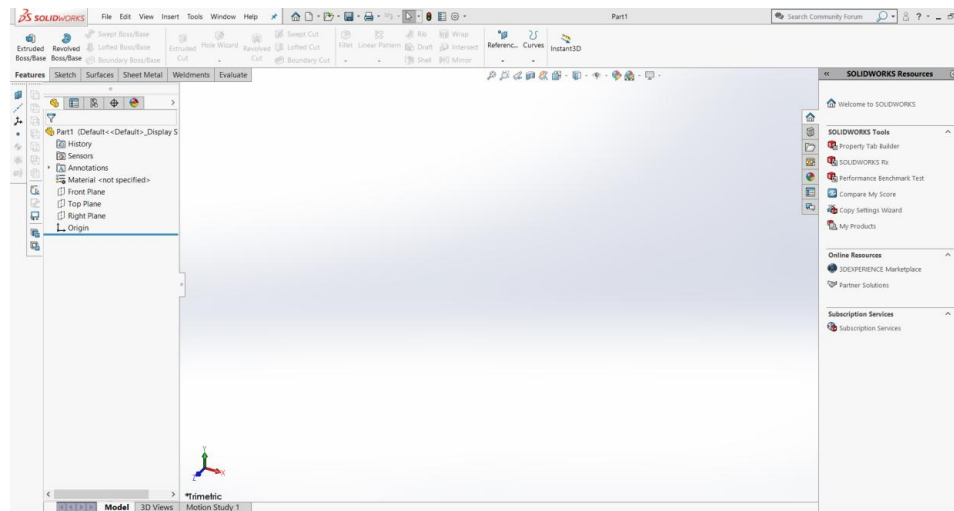
Slika 2. Faze proizvodnje aditivnom tehnologijom [4]

3.1.1 Prva faza

Proces aditivne proizvodnje započinje konstruiranjem trodimenzionalnog geometrijskog modela u računalnom CAD programu. Najčešće se u komercijalnu svrhu koriste sljedeći CAD programi [4]:

- Catia,

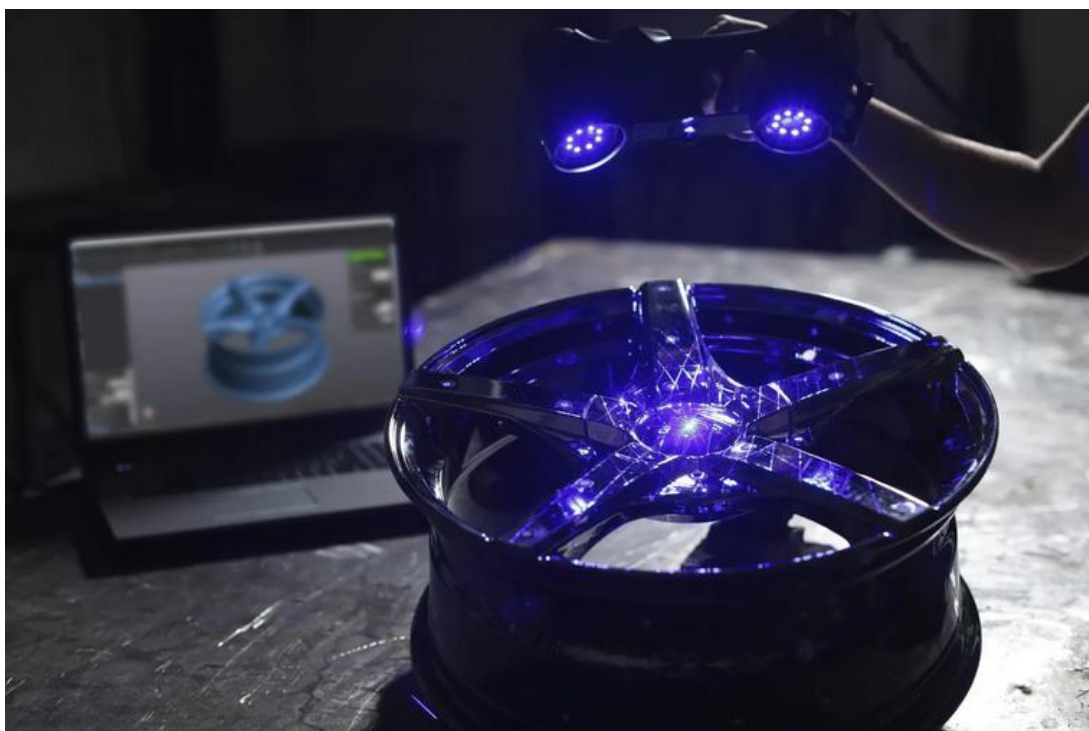
- SolidWorks,
- Fusion 360,
- Inventor .



Slika 3. Prikaz sučelje programa SolidWorks

Na slici 3. prikazano je sučelje programa SolidWorks.

Danas se za izradu modela koriste i 3D skeneri. 3D skener je uređaj koji analizira predmet u stvarnom svijetu te prikuplja podatke o njegovim dimenzijama i izgledu. Na slici 4. prikazan je uređaj za 3D skeniranje HandySCAN.



Slika 4. HandySCAN 3D skener

3.1.2. Druga faza

3D model se nakon toga pohranjuje u STL format. STL format je izvorni format datoteka za CAD softwear. STL datoteku je izumila tvrtka 3D Systems 1987.godine, a predmet se prikazuje kao mrežu povezanih trokuta. [4]

3.1.3. Treća faza

STL datoteka se prenosi na radni stroj, u tom trenutku na 3D modelu dopušteno je vršiti osnovnu manipulaciju (pozicija, veličina i smjer izrade). [4]

3.1.4. Četvrta faza

Prije izrade prototipa, stroj za izradu odnosno parametri stroja moraju se podesiti. Parametri stroja se odnose na izradu prototipa. U parametre ubrajamo sljedeće: debljina sloja, temperatura podloge na kojoj se vrši ispis, temperatura mlaznice, brzina izrade i slično. [4]

3.1.5. Peta faza

Nakon što se završi podešavanje postavka odnosno parametara stroja, stroj se pušta u rad. Postupak izrade prototipa je automatiziran, međutim potrebno je osigurati kontinuirani izvor električne energije i da se izbjegne nedostatak materijala. [4]

3.1.6. Šesta faza

Nakon što stroj završi zadnji sloj, slijedi vađenje gotovog prototipa iz radnog prostora stroja. Kod vađenja gotovog prototipa iz stroja potrebno je pripaziti da je temperatura unutarnjeg radnog prostora uređaja dovoljno niska te da nema trenutno pokretnih dijelova koji bi djelatnika doveli u opasnost. [4]

3.1.7. Sedma faza

Nakon što se gotovi prototip izvadi, prototipu će možda biti potrebna dodatna obrada. U dodatnu obradu spada „čišćenje“ prototipa, odnosno uklanjanje dodatnih potpornih dijelova. Takva vrsta postupka zahtijeva mirnoću i iskustvo. [4]

3.1.8. Osma faza

U ovoj fazi prototip je spreman za rad. Međutim, prototip će možda zahtijevati dodatnu obradu prije korištenja, a to su premaz za popunjavanje, bojanje i lakiranje u svrhu da se dobije prihvatljiva tekstura prototipa za slaganje s drugim mehaničkim ili elektroničkim komponentama. [4]

3.2. Vrste aditivne tehnologije

Proizvodnju aditivnom tehnologijom (AM) možemo podijeliti u nekoliko skupina koje ovise o vrsti materijala koja se koristi za izradu te u kojem stanju je materijal i načinu spajanja materijala.

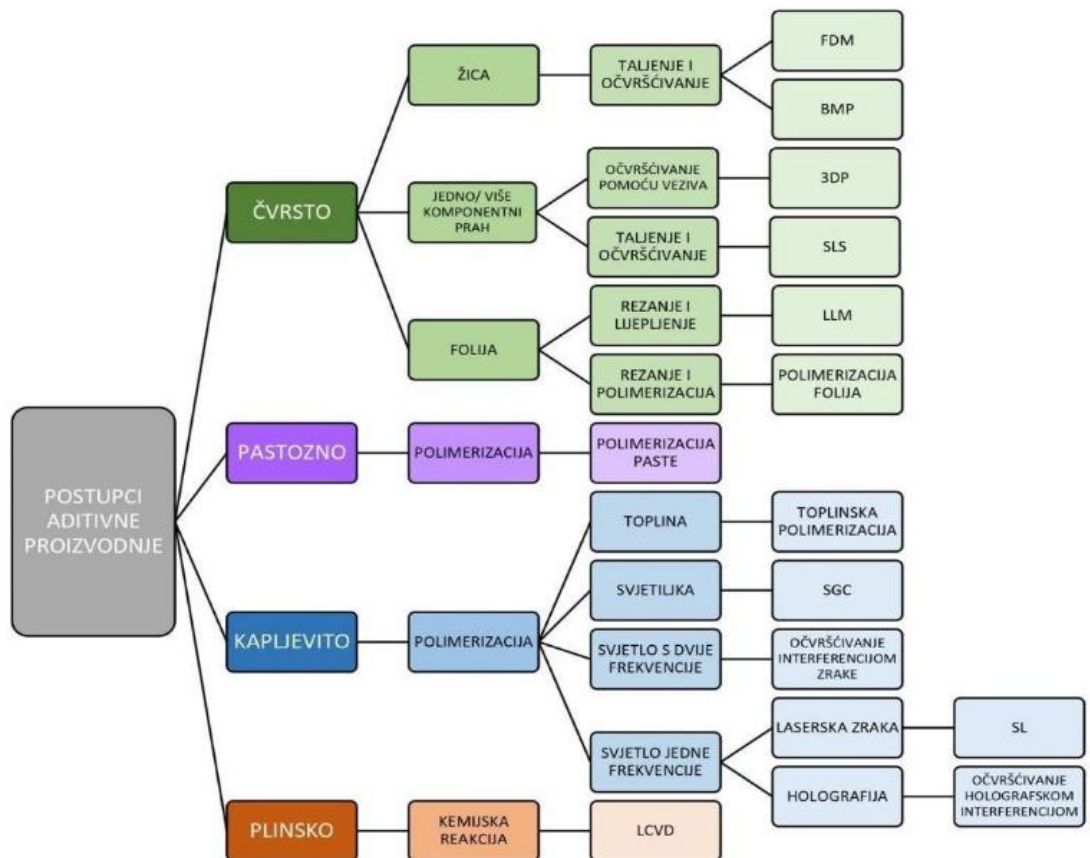
Na slici 5. prikazana je podjela postupaka aditivne tehnologije prema stanju i prema načinu spajanja.

Materijal se prema stanju dijeli na :

- Tekuće (epoksi smole, fotoosjetljive smole, itd.),
- Čvrsto (polimeri, žica, folija) ,
- Praškasto (polimeri, metali i keramika) .

Način spajanja materijala se dijeli na:

- Taljenje ,
- Polimerizacija,
- Laminiranje .



Slika 5. Postupci aditivne proizvodnje

3.2.4. SLA

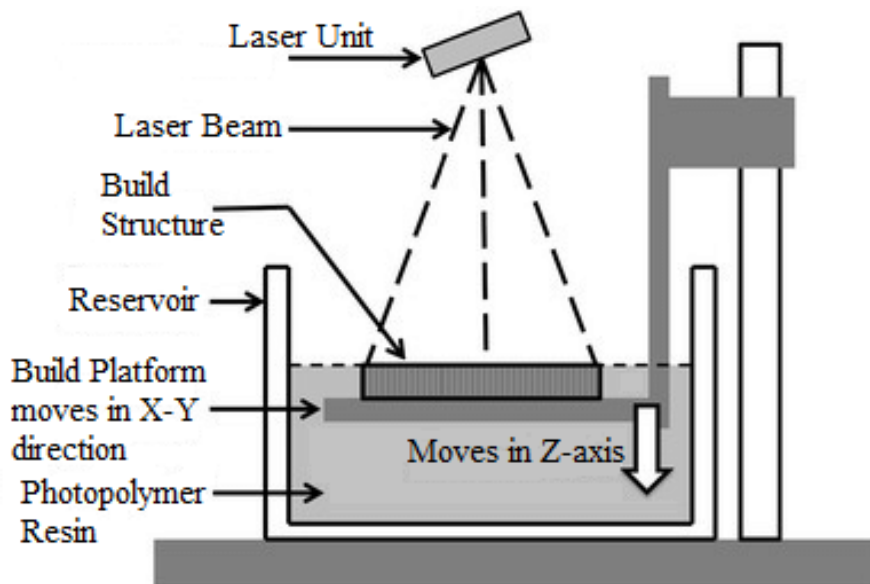
SLA ili Stereolitografija (eng. „Stereolithography“) se najčešće koristi u proizvodnji aditivnom tehnologijom. SLA se temelji na fotolitografskim metodama s ultraljubičastom polimerizacijom, a ono omogućuje očvršćivanje fotopolimera koji je osjetljiv na djelovanjem UV (ultraljubičasto) zračenja u tankim slojevima fotopolimera pomoću lasera.

SLA metodom se najčešće prerađuju fotopolimeri koji se temelje na akrilnim, vinalnim i epoksidnim smolama. [1]

Osnovni dijelovi uređaja za stereolitografiju su:

- Ar ili HeCd laser,
- Optička oprema,
- Zrcalo,
- Posuda s fotopolimerom,
- Radna podloga.

Slika 6. prikazuje shematski prikaz uređaja za SLA i njegove dijelove.



Slika 6. Shematski prikaz uređaja za SLA [22]

3.2.4.1. Princip rada SLA

SLA uređaj radi na principu generiranja i usmjeravanja laserske UV (ultraljubičaste) zrake koja uz pomoć pripadajuće optičke opreme UV zraku usmjerava na različite horizontalne površine fotopolimera te se molekule unutar fotopolimera selektivno očvršćuju prilikom zračenja. [1]

Prvi ili početni sloj se nanosi na metalnu radnu podlogu te se nakon završetka nanošenja početnog sloja radna podloga spušta po vertikalnoj osi za debljinu idućeg sloja. Materijal s kojime izrađujemo proizvod je u tekućem stanju, prilikom izrade kompleksnih dijelova koristi se potporanj.

Fotopolimeri koje se koriste u SLA reagiraju na radijaciju, koja je uzrokovana UV zračenjem. UV zračenje kod takvih materijala potiče kemijsku reakciju, pri kojoj se fotopolimer stvrdnjava. Za postizanje kemijske reakcije i stvrdnjavanje koriste se sljedeće radijacijske zrake: γ zrake, rendgenske zrake ili X- zrake, snop elektrona, UV zrake i vidljiva svjetlost.

Prednosti SLA postupka:

- detaljna i fina površina,
- visoka točnost,
- mogućnost izrade kompleksnih modela,
- automatiziran postupak,
- mogućnost izrade višebojnih proizvoda.

Nedostatci SLA postupka:

- potrebni su potpornji „zidovi“ i njihovo uklanjanje,
- naknadna obrada proizvoda,
- deformacija fotopolimera uslijed očvršćivanja,
- razvijanje otrovnih plinova pri izradi proizvoda,
- ograničeni materijali za izradu.

SLA postupak se koristi u različitim granama industrije.

Područja primjene postupka SLA:

- medicina i stomatologija,
- nakit,
- znanost,
- strojarstvo,
- umjetnost.

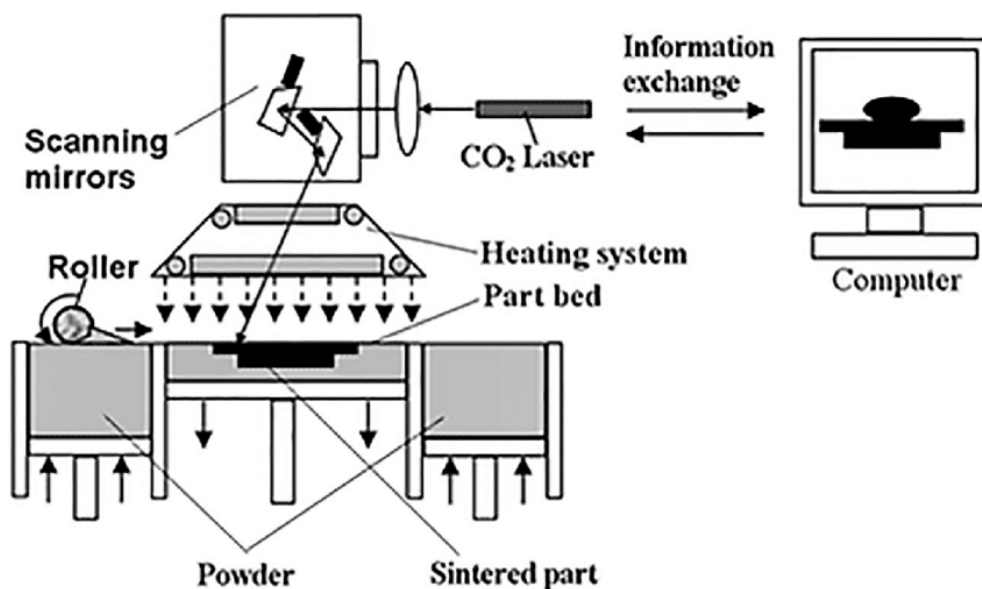
3.2.5. SLS

SLS ili Selektivno lasersko sraščivanje (eng. „Selective Laser Sintering“) je postupak koji je patentiran 1989. godine te je jedno od važnijih postupaka u aditivnoj tehnologiji. Ovim postupkom mogu se prerađivati gotovo sve vrste materijala koji su u praškastom obliku (stanju).

U proizvodnji SLS postupkom koriste se sljedeći materijali:

- keramika,
- razne vrste voskova,
- metalne prahove,
- polimerne materijale (PVC-polivinil klorid, elastomeri,PA-poliamid („najlon“).

Prilikom izrade metalnih dijelova SLS postupkom koriste se metalni prahovi s odgovarajućim metalnim i polimernim vezivima te jednokomponentni prahovi kojima nisu potrebna veziva. Prilikom korištenja materijala s vezivom, nakon završetka izrade proizvoda, potrebna je dodatna obrada proizvoda gdje se uklanja vezivo. Također, dodatnom odbradom dobiva se poroznost proizvoda te je time potrebno povećati gustoću. [1] Na slici 7. su prikazan shematski prikaz uređaja za SLS i njegovi dijelovi.



Slika 7. Shematski prikaz uređaja za SLS [23]

3.2.5.1. Princip rada SLS

Kod SLS postupka radna komora je ispunjena inertnim plinom (najčešće dušikom), inertni plin smanjuje stupanj oksidacije i degradacije praha. Infracrveni grijači zagrijavaju i održavaju prah na temperaturi ispod granice taljenja kod metalnog praha, a kod ostalih dolazi ispod temperature staklenaste tranzicije praha. Infracrveni grijači se nalaze iznad radne komore i pomoćnih komora, a zadaća mu je još i održavanje temperature u okruženju proizvoda. Razlog pregrijavanja i održavanja temperature praha je vrlo bitna s ovim načinom rada jer se izbjegava trošenje lasera prilikom izrade i smanjuje se mogućnost deformacija proizvoda.

U trenutku kada se prašak formirao u odgovarajuće stanje prije pregrijavanja sloja, fokusirana laserska zraka se usmjerava na prašak te srašćuje samo one čestice na koje je laserska zraka usmjerena. Pomak se ostvaruje uz pomoć galvanometra. Prašak koji je i dalje u početnom stanju služi kao potpora za sljedeći sloj. Nakon svakog sloja, printer automatski spušta radnu platformu za visinu sloja te se sloj praška poravnava prije izrade novog sloja.

Nakon što izrada proizvoda završi, potrebno je proizvod ostaviti u radnoj okolini stroja da se postepeno hladi, kako bi se omogućilo pravilno formiranje proizvoda. Ukoliko se navedena procedura ne poštuje, postoji mogućnost pojave degradacije, oksidacije i deformacije pri nagloj promjeni temperature. [1]

Prednosti postupka SLS-a:

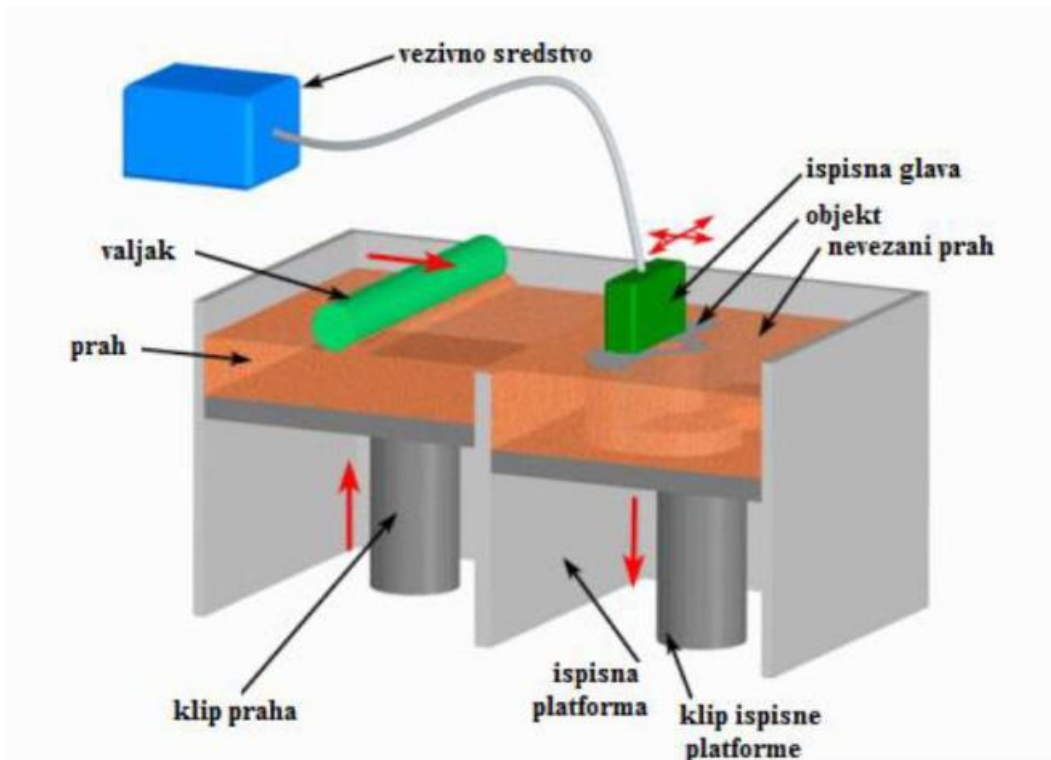
- velika primjena različitih materijala,
- brza izrada,
- ostatak praha koji nije srašćen, služi kao potpora za sljedeći sloj,
- Prah koji je ostao neiskorišten može se ponovno iskoristiti.

Nedostatci postupka SLS-a:

- loša kvaliteta površine proizvoda,
- mogućnost da se neiskorišteni prah očvrstne tijekom procesa izrade proizvoda,
- potrebna je zaštitna atmosfera kod upotrebe određenih materijala,
- razvijanje otrovnih plinova tijekom postupka.

3.2.6. 3D tiskanje

3D tiskanje ili „3D printanje“ je 1989. godine patentirala tvrtka MIT-a (Massachusetts Institute of Tehnology“). 3D tiskanje se temelji se na mlaznicama tipa inject, a one nanose tekuće vezivo na materijal koji je u praškastom stanju i povezuju ga u jednu cjelinu. Postupak 3D tiskanja jednostavan je postupak proizvodnje, a može se pokrenuti i kod kuće ili u uredu pošto uređaj za 3D tiskanje nije nedostupan za korištenje u manjim prostorima i ne proizvodi otrovne plinove. Kvaliteta printanog dijela ovisi o kvaliteti uređaja i materijala. [1]



Slika 8. Shematski prikaz uređaja za 3D tiskanje [4]

Na slici 8. je prikazan shematski prikaz uređaja za 3D tiskanje i njegovi dijelovi.

3.2.6.1. Princip rada postupkom 3D tiskanja

Postupak se temelji na spajanju čestica prahom s vezivom. Unutar spremnika se nalazi vezivo, dok se ispisna glava pomiče u smjeru x-osi i y-osi, a platforma se pomiče u smjeru z-osi. Valjak u prvom dijelu postupka nanosi materijal iz spremnika na ispisnu platformu. Kad se završi prvi dio postupka, višak materijala pada u spremnik za višak materijala. U trenutku kada valjak počinje povratni proces, vezivo u tekućem stanju nanosi se na nanoseni prah uz pomoć mlaznica koje se nalaze na valjku što rezultira povezivanjem čestica materijala.

U trenutku kada se sloj završi, ispisna platforma se spušta po z-osi te se proces ponavlja.

Kada se postupak završi, materijal koji se nije spojio pomoću veziva može se očistiti te se ponovno upotrijebiti za sljedeći proces 3D tiskanja.

Prednosti postupka 3D tiskanja:

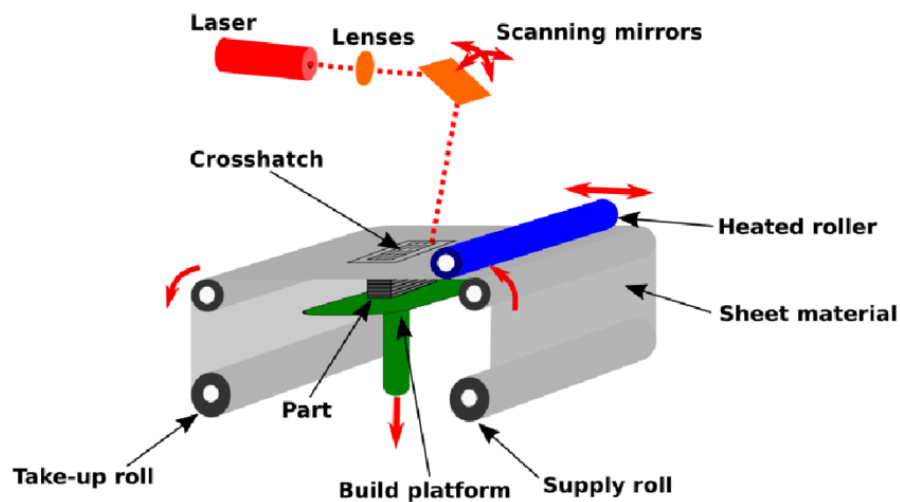
- kraće vrijeme izrade proizvoda u odnosu na druge slične postupke proizvodnje,
- jeftin materijal,
- neiskorišteni materijal se ponovno iskoristiti,
- nema potrebe za potporom

Nedostatci postupka 3D tiskanja:

- loša kvaliteta površine proizvoda,
- potrebno je određeno vrijeme za stvrdnjavanje proizvoda,
- broj primjenjivih materijala je limitiran,
- materijal zahtijeva obradu prije korištenja.

3.2.7. LLM

LLM (eng. „Layer Laminated Manufacturing“) ili laminiranje je postupak koji se temelji na korištenju lasera na bazi CO_2 . Pomoću lasera se reže prethodno postavljene laminirane materijale. Materijal za laminiranje se postavlja po poprečnom presjeku proizvoda te se izvodi pomoću računala. LLM postupak je bio predstavljen 80-ih godina 20. stoljeća. Na slici 9. je prikazan shematski prikaz uređaja za laminiranje i njegovi dijelovi.



Slika 9. Shematski prikaz uređaja za LLM [24]

3.2.7.1. Princip rada LLM-a

Prilikom izrade modela postupkom LLM-a, početni sloj se nanosi pomoću zagrijanog valjka s materijalom koji prelazi preko radne površine ili prethodno nanesenog sloja.

Nakon svakog sloja, laserskom zrakom izrezuje se vanjski opseg presjeka dijela proizvoda koji se izrađuje. Nakon što se izrezivanje završi, zagrijanim valjkom se prelazi preko sloja kako bi se nanio novi sloj.

Radna podloga se nakon svakog izrezanog sloja spušta za debljinu sljedećeg sloja te se proces ponavlja dok se model ne izradi.

Kada proces izrade završi, višak materijala se odstranjuje sa radne podloge, kako bi se olakšalo „skidanje“ proizvoda sa radne podloge.

Prednosti postupka LLM-a :

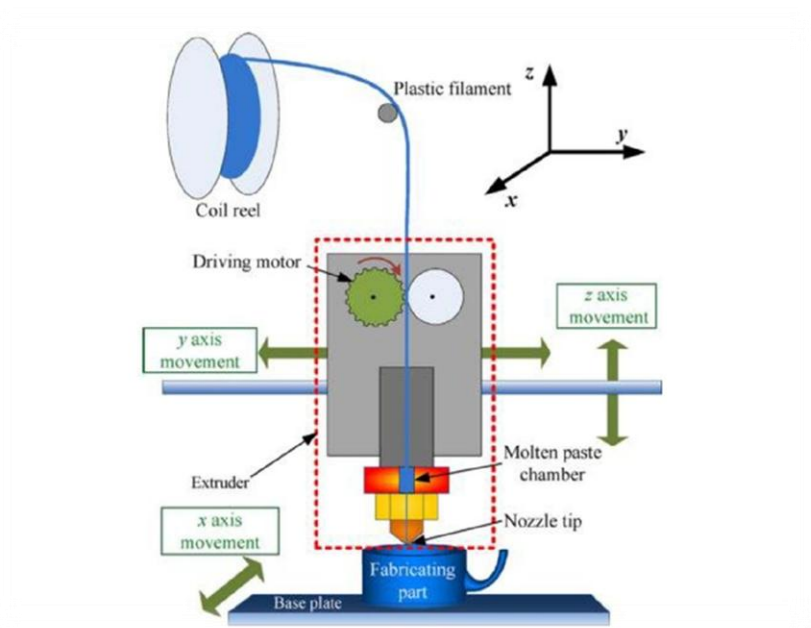
- velika brzina izrade proizvoda,
- mogućnost izrade proizvoda velikih gabarita ili volumena,
- nema zaostalih naprezanja unutar proizvoda,
- potpornji „zidovi“ nisu potrebni,
- pristupačna cijena materijala.

Nedostatci postupka LLM-a :

- broj materijala je limitiran,
- naknadna završna obrada (odstranjivanje viška materijala),
- potreban je zasebni rashladni uređaj
- mogućnost pojave raslojavanja,
- proizvodi koji u sebi imaju šupljinu potrebno ih je izrađivati u dva dijela.

3.2.8. FDM

FDM (eng. „Fused Deposition Modeling“) ili taložno očvršćivanje je postupak aditivne proizvodnje koji je patentiran od američke tvrtke Stratasys 90-tih godina 20.stoljeća. Postupak se temelji na principu nanošenja materijala „sloj po sloj“. Materijal je najčešće polimer. Uređaj radi na principu osnovnog troosnog NC sustava, koji omogućuje gibanje u smjeru x,y, i z osi. Na slici 10. je prikazan shematski prikaz uređaja za FDM i njegovi dijelovi.



Slika 10. Shematski prikaz uređaja za FDM [25]

3.2.5.1 Princip rada FDM-a

Polimerni materijali su u krutom stanju i u obliku žice. Materijal ima oblik žice, koji prolazi kroz mlaznicu ekstrudera, gdje se kontrolira protok materijala koji se taloži na radnu plohu. Na ekstruderu se nalaze grijači koji griju mlaznicu na zadanu temperaturu tališta materijala koji se u tom trenutku upotrebljava. Ekstruder se kreće u smjerovima x-osi i z-osi, a radna podloga u smjeru y-osi (ovisno o tipu printera). Kretanje ekstrudera i radne plohe se određuje nakon što se učitava 3D model u obliku STL datoteke. Materijal se tali („topi“) u obliku tankih niti te se polaže „sloj po sloj“ na određena mjesta na radnoj podlozi koja je unaprijed definirana G-codom. Nakon polaganja nit se hladi i očvršćuje. Ekstrudirani materijali se trenutno skrućuju pri doticaju sa radnom podlogom ili prethodno položenim slojem. Nakon svakog položenog sloja, radna podloga ili ekstruder se pomiče gore ili dolje po z-osi (ovisno o tipu stroja).

Prednosti FDM-a:

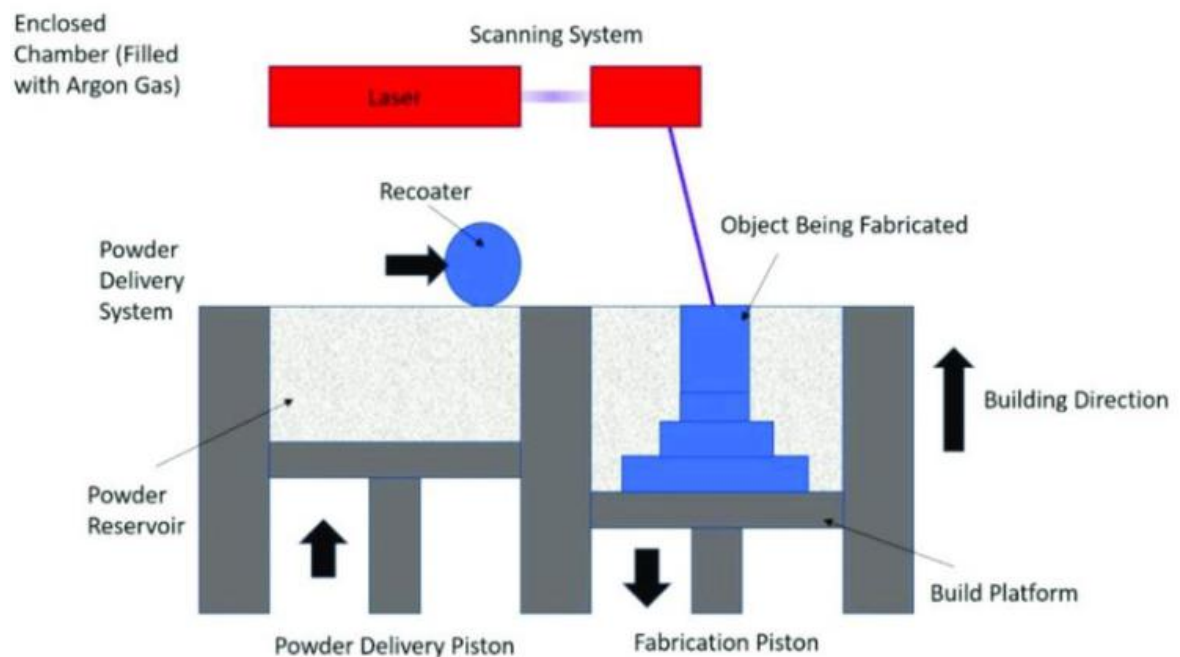
- mala potrošnja energije,
- nema potrebe za hlađenjem uređaja,
- jednostavno korištenje,
- niska cijena materijala,
- niski troškovi održavanja uređaja,
- mala veličina uređaja.

Nedostaci FDM-a:

- limitiran broj primjenjivog materijala,
- postoji potreba za odstranjivanje materijala (brim ili podupor),
- niska kvaliteta izrade (vidljive su linije slojeva),
- manja čvrstoća proizvoda u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje,
- zaostala naprezanja u proizvodu,
- potrebna naknadna obrada.

3.2.9. SLM

SLM (eng. „Selective Laser Melting“) je jedan od postupaka izrade proizvoda aditivnom tehnologijom, a postupak se koristi za izradu proizvoda visoke gustoće. Postupak je sličan SLS-u. Kod SLM-a se temperatura povećava sve do potpunog taljenja materijala, što nam omogućuje izradu krutih i gustih metalnih proizvoda bez korištenja veziva i naknadne obrade proizvoda. Na slici 11. je prikazan shematski prikaz uređaja za SLM i njegovi dijelovi.



Slika 11. Shematski prikaz uređaja za SLM [26]

3.2.9.1. Princip rada SLM-a

Materijal kod SLM-a je u praškastom stanju te se nalazi u spremniku. Postoje različiti tipovi uređaja gdje se materijal nanosi putem lijevka ili raspršivača. Kod uređaja koji nanosi materijal pomoću lijevka, materijal koji je u praškastom stanju nanosi se izravno iznad podloge. Spremnik se podiže na određenu visinu, tako da se određena količina materijala može jednako rasporediti po radnoj površini uz pomoć mehanizma za niveliranje.

Praškasti slojevi koji se preklapaju sa površinom proizvoda, zagrijavaju se na temperaturu njegovog tališta te se povezuju s prethodnim skrtnutim slojem uz korištenje fokusirane laserske zrake. Koriste se optički laseri zbog manje potrošnje električne energije te održavanje stroja je jednostavnije.

Nakon što se sloj skruti, radna podloga stroja se spušta za visinu idućeg sloja te se proces ponavlja do završetka izrade proizvoda.

Kod metalnih materijala, postupak se vrši u zatvorenoj komori ispunjenom dušikom ili argonom, da bi se smanjio postotak kisika u atmosferi, zbog mogućnosti pojave oksidacije prilikom procesa.

Prednosti SLM-a :

- širok spektar materijala,
- visoka točnost izrade,
- visoka dinamička izdržljivost,
- velika dimenzije radne podloge.

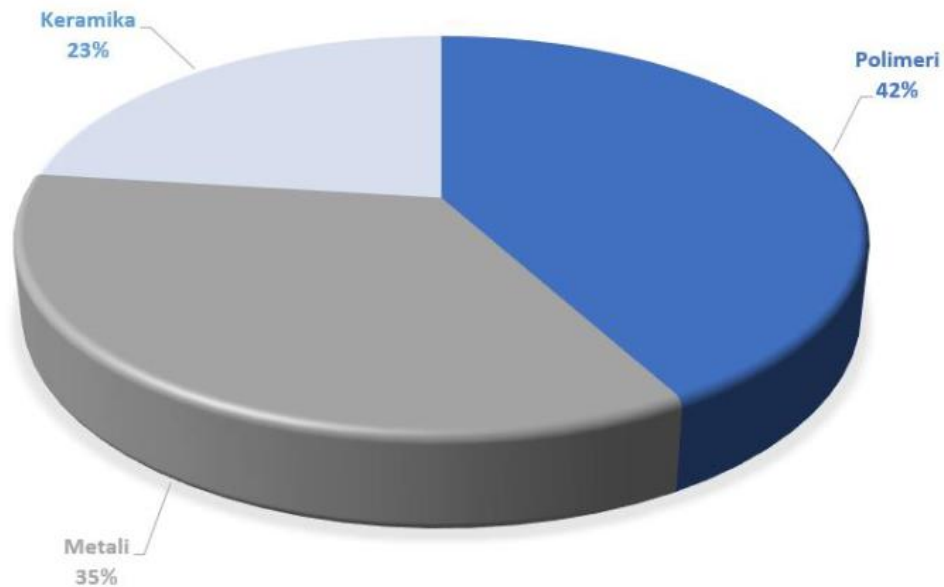
Nedostatci SLM-a :

- potreba za završnom obradom,
- manja točnost od SLS-a,
- potreban inertan plin prilikom izrade metalnim materijalima,
- visoki troškovi izrade.

3.3. Materijali u AM

U proizvodnji aditivnom tehnologijom koristimo sljedeće vrste materijala: polimeri, keramika i razne vrste metala.

Na slici 12. prikazan je postotni udio materijala koji se koristi u aditivnoj proizvodnji.



Slika 12. Udio materijala u aditivnoj proizvodnji [1]

3.3.1. Polimeri

Polimeri su kemijske tvari građene od golemih molekula sastavljenih od vrlo mnogo strukturnih jedinica koje se sastoje od strukturnih jedinica ili mera koje se ponavljaju. Polimere prema podrijetlu možemo podijeliti na prirodne i sintetske.

Kako je tehnologija napredovala, također su napredovale i nove skupine polimernih materijala, kao što su: biorazgradivi polimeri, elektrovodljivi polimeri, kapljevit polimerni kristali i polimeri visokotemperaturne postojanosti. Polimeri posjeduju sljedeća svojstva: dobri toplinski i električni izolatori, mnogi su otporni na kiselinu i lužinu, nisu izloženi koroziji, lako se oblikuju, dobro upijaju vibracije, imaju niski faktor trenja (otporni na trošenje) te niska cijena, što je uzrokovalo da polimerni materijali zamjenjuju neke metale. Najveći nedostatak polimernih materijala je njihova biološka nerazgradivost. [5]

3.3.1.1. *Plastomeri*

Plastomeri ili termoplasti spadaju u sintetične polimere, a molekule im se sastoje od dugih lanaca. Prilikom zagrijavanja plastomer omekša te se može oblikovati, a prilikom hlađenja se stvrdne i ponovno postane čvrst. Taj postupak možemo više puta ponoviti, a da se masa ne promijeni. Plastomeri se dijele na dvije vrste, a to su amorfni i kristalasti plastomeri. Amorfni plastomeri su fleksibilniji, te ih se lakše obrađuje, dok su kristalasti plastomeri gušći, tvrdi te su otporniji na kiselinu od amornih polimera. [5]

3.3.1.2. *Elastomeri*

Elastomeri su skupina tvari koji imaju karakter mekih termoplasta, ali premošćenjem veza prelaze u gumi elastično stanje. Elastomere karakterizira mala tvrdoća, ali velika elastičnost materijala. Dobivaju se iz nafte i prirodnog plina te posjeduju svojstvo vraćanja u prvobitni oblik nakon deformacije, ali to se svojstvo smanjuje prilikom nižih temperatura. [5]

Najčešće ih se koriste za izolaciju i zaštitu, ali često ih se koriste za materijal s kojim se prigušuje vibracija i buka te brtve i slično. [5]

3.3.1.3. *Duromeri*

Duromeri su tvari koje na višim temperaturama omekšaju i postaju plastični te hlađenjem otvrdnu, a prilikom ponovnog zagrijavanja ne omekšaju. Duromeri posjeduju visoku čvrstoću i modul elastičnosti te visok modul smicanja prilikom utjecaja visokih temperatura.

Koriste ih se kao konstrukcijski materijal te ljepila i lakovi. [5]

3.3.2. Keramika

Keramika kao materijal kod aditivne proizvodnje se najmanje koristi, ali njezina korisna svojstva čine ju korisnim materijalom u aditivnoj proizvodnji, a to su: tvrdoća, otpornost na: trošenje, vodu i toplinu. [4]

Njezina kompatibilnost s ostalim skupinama materijala je vrlo važno svojstvo u medicini, gdje se keramika koristi unutar ljudskog tijela te ima minimalan utjecaj na ljudsko tkivo. Upravo zbog toga se keramika koristi za izradu implantata, koji služe kao zamjena za kosti i zglobove. [4]

3.3.3. Metali

Metali su jedno od najzastupljenijih vrsta materijala u AM, upravo zbog svojih korisnih svojstva: krutost, žilavost, električna vodljivost, toplinska vodljivost i otpornost na trošenje. U aditivnoj proizvodnji metali se najčešće koriste u automobilskoj i robotskoj industriji te u biomedicini i zrakoplovnoj industriji. [4]

U AM se najčešće koriste sljedeći metali: Čelik, Titan, Aluminiij, Kobalt, Krom i legure navedenih materijala. [4]

4.0 PRAKTIČNI DIO

U praktičnom dijelu je opisana ljudska sluznica, usna šupljina i njezini dijelovi te su navedeni fleksibilni materijali za aditivnu proizvodnju i materijali koji se koriste za ispitivanje, da bi se dobila mehanička svojstva istih.

Generalna nit vodilja završnog rada je istražiti fleksibilne materijale za FDM koji imaju slična mehanička svojstva kao ljudsko tkivo u usnoj šupljini.

Osnovna namjena bila bi za izradu vjernih fizičkih 3D anatomskih modela koji se mogu koristiti za funkcionalno planiranje operacije.

Dakle, isprinta se anatomski model iz polimera koji ima vrlo slična svojstva kao ljudsko tkivo te se koristi za izradu plana operacije. Kirurg može rezati, isprobavati i prilagoditi vijke i stezne pločice, dentalne implantate te može vidjeti putanje živca i slično.

Glavni cilj je smanjiti vrijeme koji pacijent provede na „stolu“ za vrijeme operacije.

4.1 Ljudska sluznica i usna šupljina

Ljudska sluznica je unutarnji sloj tkiva koji oblaže šuplje organe i neke tjelesne šupljine. Ljudska sluznica se sastoji od pokrovnog epitela i sloja rahloga vezivnoga tkiva u kojem se nalaze sitni ogranci krvnih i limfnih žila, glatke mišićne stanice te žlijezde koje stvaraju sluz.

Sluznica svojim pokrovnim epitelom i zaštitnim slojem vlažne sluzi čuva od štetnih utjecaja organe dišnoga, probavnoga, mokraćnoga, spolnog i drugih sustava.

U nastavku će biti opisani samo dijelovi usne šupljine, kod kojih je poznata vlačna čvrstoća i modul elastičnosti. [15]

Usna šupljina je omeđena sa zubnim lukovima. Tvrdo nepce oblikuje gornju stjenku usne šupljine, a meko nepce odvaja usnu šupljinu od nosne šupljine i gornjeg dijela ždrijela. [15]

Tvrdo nepce (eng. Hard plate) tvori dvije trećine krovne usne šupljine. Koštanu osnovu tvrdoga nepca izgrađuju :

- dvije parne kosti,
- nepčani nastavak gornje čeljusti,
- nepčana kost.

Kosti su prekrivene sluznicom, koja je čvrsto srasla uz koštanu podlogu.

Meko nepce (eng. Soft plate) tvori stražnju trećinu krovne usne šupljine. Meko nepce je vezivno-mišićna ploča s dvije površine i stražnjim slobodnim rubom.

4.1.1 Obraz

Bočno na usnici se nastavlja obraz. M.buccinator je osnovna obraza. Mišić je pločast i polazište mu je linearno. Njegova glavna zadaća je da hranu protisne iz predvorja u usnu šupljinu ili da hranu postavi među zube za usitnjavanje. Na unutarnjoj strani obraza je sluznica, koja se uz pomoć submukoznoga veziva čvrsto drži za mišićnu osnovu.[15]

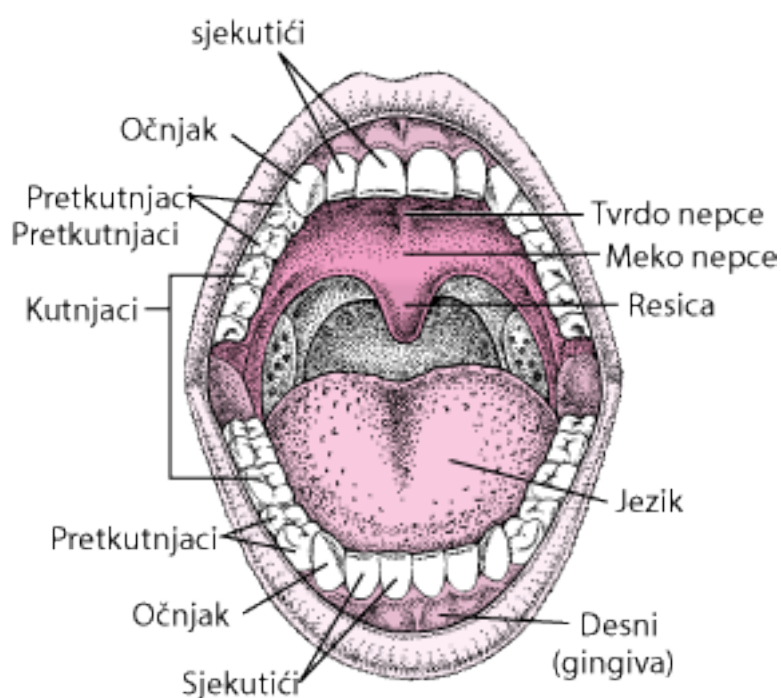
4.1.2 Zubi

Zubi su usađeni u zubne jamice alveolarnih nastavaka gornje i donje čeljusti. Ljudi imaju 32 zuba, s time da tijekom svoga života zubi dva puta izbijaju. Prvo izbijaju 20 netrajnih ili mliječnih zuba koji započinju izbijati u dobi od 7 mjeseci života te završava tijekom prve dvije godine. Između 7. i 12. godine mliječni zubi se zamjenjuju trajnim zubima, točnije sa 32. trajna zuba. [15]

Trajni zubi se dijele u četiri skupine, a to su:

1. sjekutići,
2. očnjaci,
3. pretkutnjaci,
4. kutnjaci.

Na slici 13. su prikazani dijelovi usne šupljine.



Slika 13. Usna šupljina [19]

4.1.2.1 Dijelovi zuba

Na svakom zubu razlikuje se korijen, vrat i kruna. [15]

Korijen zuba je dio zuba usađen u zubnu jamicu, i njime zub je učvršćen u čeljust pomoću vezivnog tkiva. [15]

Vrat zuba je suženi dio koji prelazi iz korijena u krunu [15].

Kruna zuba je slobodni dio zuba koji strši u usnoj šupljini. [15]

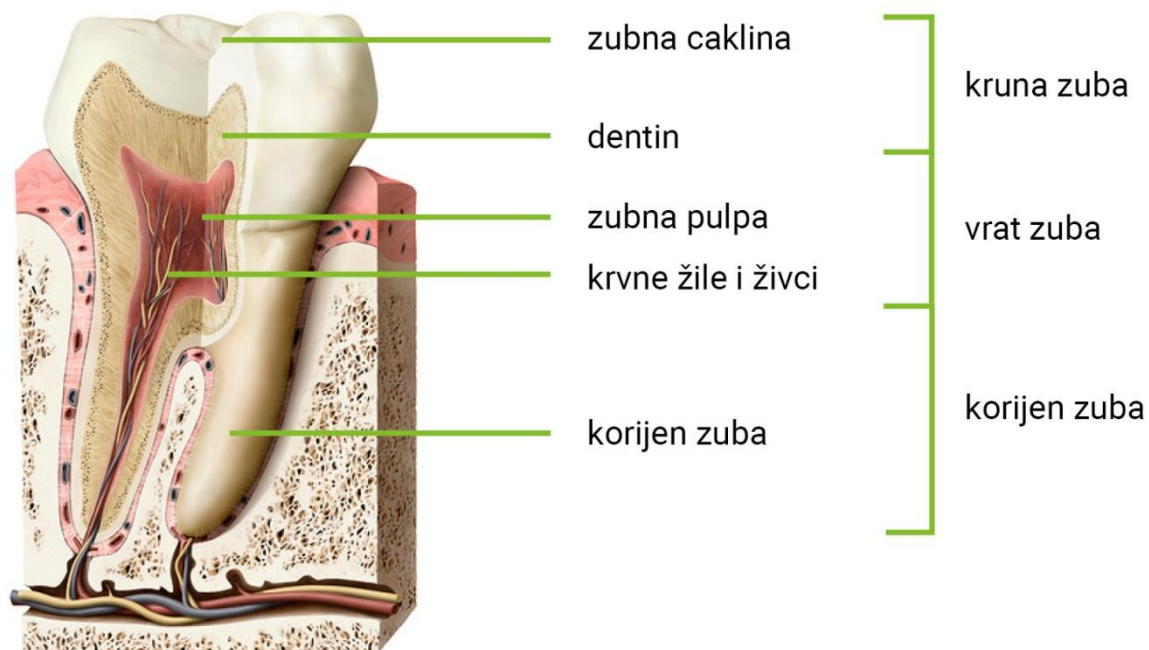
Šupljina unutar zuba se naziva zubna šupljina. [15]

4.1.2.2 Građa zuba

Zub je izgrađen od tri tvari, a to su: dentin, caklina, cement. [15]

Dentin je tvrdi koštani dio zuba koji u potpunosti omeđuje zubnu šupljinu, a njega u razini korijena zuba pokriva cement. Područje oko krune, zub prekriva caklina. Caklina je najtvrdža i najotpornija tvar u ljudskom tijelu. [15]

Na slici 14. je prikazana građa zuba.



Slika 14. Građa zuba [20]

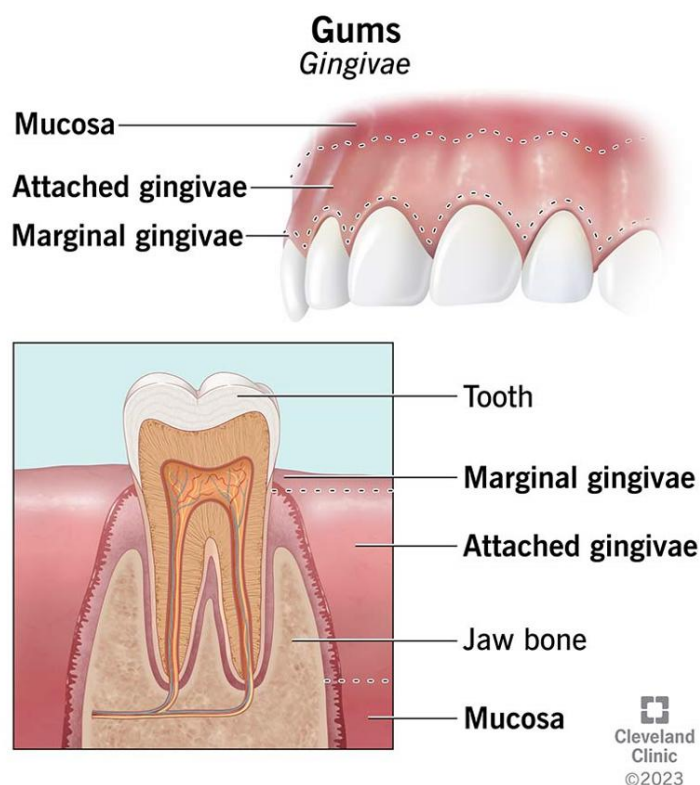
4.1.2.3 Zubno meso

Gingiva (desni; eng. Gums) je mastikatorna sluznica koja prekriva alveolarne nastavke gornje i donje vilice. Gingiva se dijeli na slobodnu (marginalnu) i pripojnu gingivu. [20]

Slobodna gingiva (eng. Marginal gingivae) je slobodni rub gingive oko zubnoga vrata omeđen dnom gingivnoga žlijeba i gingivnom brazdom. Svjetloljubičaste boje, talasasta je i visoka oko 0,5-2 mm. [20]

Pripojna gingiva (eng. Attached gingivae) je čvrsto pripojena za podlogu (alveolarnu kost i korijen zuba), a još se naziva fiksna gingiva. [20]

Na slici 15. su prikazani dijelovi usnog mesa oko zuba.



Slika 15. Zubno meso [21]

4.2 Fleksibilni materijali

Fleksibilni materijali izrađeni aditivnom tehnologijom, koja se često naziva 3D ispisom, nude širok raspon mogućnosti za izradu složenih i prilagođenih proizvoda. Ovi materijali, kao što su termoplastični elastomeri (TPE) i fleksibilni filamentni poput TPU (termoplastični poliuretani), mogu se koristiti za proizvodnju predmeta kao što su nosivi uređaji, protetika i fleksibilna elektronika. Aditivna proizvodnja omogućuje preciznu kontrolu nad svojstvima materijala i zamršenim dizajnom, što je čini idealnom za proizvodnju fleksibilnih komponenti sa specifičnim mehaničkim karakteristikama prilagođenim predviđenoj primjeni.

4.2.1 Mehanička svojstva fleksibilnih materijala

Mehanička svojstva odnose se na karakteristike materijala koje opisuju kako se ponašaju pod primijenjenim silama, kao što su čvrstoća, elastičnost, duktilnost i tvrdoća. Ta su svojstva ključna u raznim industrijama, uključujući inženjerstvo, proizvodnju i građevinarstvo, jer određuju kako će se materijali ponašati u različitim primjenama.

Fleksibilni materijali proizvedeni tehnologijama aditivne proizvodnje (AM) obično pokazuju niz mehaničkih svojstava prilagođenih specifičnim primjenama. Ta svojstva mogu uključivati:

1. Fleksibilnost

Fleksibilni materijali proizvedeni AM tehnologijama često imaju visok stupanj elastičnosti, što im omogućuje savijanje, istezanje i deformiranje bez lomljenja. Ova fleksibilnost je ključna za primjene koje zahtijevaju da dijelovi izdrže opetovana savijanja ili rastezanja. Fleksibilnost u tehnologijama aditivne proizvodnje (AM) odnosi se na sposobnost proizvodnje dijelova s različitim stupnjevima elastičnosti i deformabilnosti. AM procesi, poput selektivnog laserskog sinteriranja (SLS) i modeliranja taloženja (FDM), nude fleksibilnost za korištenje širokog raspona materijala s različitim mehaničkim svojstvima, uključujući fleksibilne i elastomerne materijale.

Ovi fleksibilni materijali, kao što su termoplastični elastomeri (TPE), termoplastični poliuretani (TPU) i smole na bazi silikona, mogu se koristiti za izradu dijelova koji se savijaju, rastežu i sabijaju bez lomljenja. Ova fleksibilnost omogućuje proizvodnju

prototipova, funkcionalnih dijelova i proizvoda za krajnju upotrebu sa složenim geometrijama i prilagođenim značajkama, kao što su ručke meke na dodir, brtve, brtve i nosivi uređaji.

Sposobnost proizvodnje fleksibilnih dijelova korištenjem AM tehnologija dragocjena je u industrijama kao što su roba široke potrošnje, zdravstvena njega, automobilska industrija i zrakoplovstvo, gdje su potrebne lagane, izdržljive i ergonomske komponente. Dodatno, sloboda dizajna koju nude AM procesi omogućuje inženjerima i dizajnerima da brzo ponavljaju i optimiziraju mehanička svojstva savitljivih dijelova kako bi zadovoljili specifične kriterije izvedbe i funkcionalne zahtjeve.

2. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća odnosi se na maksimalno naprezanje koje materijal može izdržati dok se rasteže ili vuče prije loma. Fleksibilni materijali proizvedeni AM tehnologijama projektirani su da imaju dovoljnu vlačnu čvrstoću da izdrže primijenjene sile bez kidanja ili pucanja.

U tehnologijama aditivne proizvodnje (AM), kao što je selektivno lasersko sinteriranje (SLS) i modeliranje taloženog taloženja (FDM), vlačna čvrstoća tiskanih dijelova kritično je mehaničko svojstvo. Vlačna čvrstoća dijelova proizvedenih putem AM može varirati na temelju nekoliko čimbenika, uključujući upotrijebljeni materijal, parametre ispisa, prijanjanje slojeva i tehnike naknadne obrade. Materijali koji se obično koriste u AM, kao što su različiti termoplasti i metali, pokazuju različite vlačne čvrstoće ovisno o svom sastavu i uvjetima obrade. Kako bi optimizirali vlačnu čvrstoću u AM dijelovima, inženjeri i dizajneri mogu prilagoditi parametre ispisa kao što su visina sloja, gustoća ispune, orijentacija ispisa i geometrija dijela. Sveukupno, razumijevanje i kontroliranje vlačne čvrstoće dijelova proizvedenih pomoću AM tehnologija bitno je za osiguravanje pouzdanosti, performansi i trajnosti tiskanih komponenti u raznim primjenama, uključujući zrakoplovnu, automobilsku, medicinsku i industriju robe široke potrošnje.

3. Istezanje pri lomu

Istezanje pri lomu mjeri koliko se materijal može rastegnuti prije nego što pukne. Fleksibilni materijali proizvedeni AM tehnologijama obično pokazuju veliko istezanje pri lomu, što im omogućuje značajnu deformaciju prije nego što dosegnu točku loma.

Istezanje pri lomu AM dijelova ovisi o različitim čimbenicima, uključujući korišteni materijal, parametre ispisa i dizajn dijela. Materijali poput termoplastičnih elastomera (TPE) i termoplastičnog poliuretana (TPU) obično se koriste u AM-u zbog njihovog velikog istezanja pri prekidu, što im omogućuje značajnu deformaciju prije kvara.

Inženjeri i dizajneri mogu optimizirati istezanje pri prekidu podešavanjem parametara ispisa kao što su gustoća ispune, brzina ispisa i debljina sloja. Oni također mogu dizajnirati dijelove sa značajkama koje promiču ravnomjernu raspodjelu naprezanja, smanjujući vjerojatnost preranog kvara.

U primjenama gdje su fleksibilnost i izdržljivost ključni, razumijevanje i kontroliranje istezanja pri prekidu AM dijelova je ključno za osiguravanje pouzdanih performansi i dugovječnosti.

4. Otpornost na lom

Otpornost na trganje je sposobnost materijala da se odupre širenju pukotina ili pukotina kada je izložen primijenjenoj sili. Fleksibilni materijali proizvedeni AM tehnologijama dizajnirani su da imaju izvrsnu otpornost na trganje, osiguravajući izdržljivost i dugovječnost u zahtjevnim primjenama.

Otpornost na trganje u tehnologijama aditivne proizvodnje (AM) odnosi se na sposobnost materijala da se odupre širenju kidanja ili pukotine kada je izložen primijenjenoj sili. To je ključno mehaničko svojstvo za dijelove koji mogu doživjeti udarce, abraziju ili druge oblike mehaničkog naprezanja.

Materijali koji se obično koriste u AM, kao što su termoplasti i elastomeri, mogu pokazivati različite razine otpornosti na trganje ovisno o njihovom sastavu i parametrima obrade. Na primjer, termoplastični poliuretan (TPU) i fleksibilni filamenti poznati su po svojoj visokoj otpornosti na trganje, što ih čini prikladnima za primjene koje zahtijevaju izdržljivost i otpornost.

Inženjeri i dizajneri mogu optimizirati otpornost na trganje u AM dijelovima odabirom materijala s odgovarajućim mehaničkim svojstvima i podešavanjem parametara ispisa kao što su gustoća ispune, lijepljenje slojeva i orijentacija ispisa.

5. Kompresija

Kompresija se odnosi na sposobnost materijala da povрати svoj izvorni oblik nakon komprimiranja. Fleksibilni materijali izrađeni s AM tehnologijama mogu pokazivati nisku kompresiju, što im omogućuje da zadrže svoj oblik i karakteristike performansi tijekom

vremena, čak i pod ponovljenim ciklusima kompresije. Materijali koji se koriste u AM, kao što su termoplasti i elastomeri, mogu pokazivati različite stupnjeve kompresije ovisno o čimbenicima kao što su sastav materijala, parametri obrade i tehnike naknadne obrade. Na primjer, termoplastični elastomeri (TPE) i smole na bazi silikona poznati su po svojoj niskoj kompresiji, što ih čini prikladnima za primjene koje zahtijevaju otpornost i dugotrajnu stabilnost dimenzija.

4.2.2 Podjela fleksibilnih materijala u FDM-u

Kod FDM-a koristimo sljedeće tipove fleksibilnih materijala:

- Termoplastični poliuretani (TPU),
- Meki PLA,
- Termoplastični poliamid (TPA),
- Polietilen blok amid (PEBA),
- Termoplastični kopolijester (TPC),
- Termoplastični elastomer (TPE).

4.2.2.1 Termoplastični poliuretani (TPU)

Termoplastični poliuretani ili TPU spada u skupinu termoplastičnih elastomera koji je spoj gume i plastike. TPU je vrlo savitljiv materijal odličnih svojstava napravljen za FDM tehnologiju 3D ispisa. Ovaj materijal je specifičan po svojem svojstvu savitljivosti i elastičnosti.

Karakteristike materijala su: izuzetna visoka razina savitljivosti, mekan i ugodan na dodir , vrlo izdržljiv i otporan na udarce, te visoka čvrstoća zbog čega je koristan za cijeli spektar primjena. [6]

4.2.2.2 Meki PLA

Soft PLA ili meki PLA je posebna vrsta PLA niti za 3D ispis. PLA je napravljen od prirodnih materijala, kao što su kukuruzni škrob ili šećerne trske. Kako bi se dobio mekani PLA, PLA se dodatno kemijski tretira kako bi se uklonilo veći dio prirodne lomljivosti PLA i dobije karakteristike gume. [6]

4.2.2.3 Termoplastični poliamid (TPA)

Termoplastični poliamid ili TPA je materijal dobiven kemijskim miješanjem TPE i vrlo fleksibilnog najlona. Rezultat njihovog miješanja je kombinacije glatke i sjajne površine koja dolazi od najlona te visoka fleksibilnost dobivena od TPE. [6]

Karakteristike materijala su: visoka fleksibilnost, visoka elastičnost, iznimno izdržljiv materijal, te dobra otpornost na toplinu. [6]

4.2.2.4 Polieter blok amid (PEBA)

Polieter blok amid (PEBA) nastaje polikondenzacijom poliamida karbonskih kiselina s polieter alkoholim. PEBA filament za 3D ispis razvijen je korištenjem Arkema termoplastičnog elastomera. Karakteristike materijala su: visoka fleksibilnost, otporno na udarce te omogućuje visoki povrat energije zato se koristi za izradu sportske opreme i potplata cipela. [7]

4.2.2.5 Termoplastični ko-poliester (TPC)

Termoplastični kopoliester (TPC) su kopolieterski esteri s izmjeničnim nizovima nasumičnih duljina bilo dugolančanih ili kratkolančanih glikola. Imaju i tvrde i meke segmente. Tvrdi segmenti su obično kratkolančane esterske jedinice, dok su meki segmenti obično alifatski polieteri i poliester glikoli. TPC se smatra materijalom inženjerske razine. Karakteristike materijala su: niska gustoća, visoka elastičnost, dobra kemijska svojstva, dobra toplinska stabilnost i otpornost na visoke temperature. [6]

4.2.2.6 Termoplastični elastomer (TPE)

Termoplastični elastomer (TPE) je polimer koji pokazuje stupanj elastičnosti sličnoj umreženoj gumi. Stupanj elastičnosti ovisi o vrsti TPE i njihovoj kemijskoj strukturi. Karakteristike materijala su: fleksibilan i mekan, dobra električna svojstva, izvrsno prigušuje vibracije, visoka udarna čvrstoća, izvrsna otpornost na kemikalije i vremenske uvjete, dobra otpornost na trošenje, otpornost na visoke i niske temperature, dobro apsorbira udarce te se može reciklirati. TPE možemo podijeliti u nekoliko skupina ,a to su: TPU, TPC, TPA. [6]

Na slici 16. je prikazana podjela gume prema tvrdoći.



Slika 16. Podjela gume prema tvrdoći [6]

4.3 Korišteni materijal

U svrhu ispitivanja mehaničkih svojstva fleksibilnih materijala, korišteni su sljedeći materijali:

- Fillamentum Flexfill TPE 90A,
- Recreus Filaflex SEBS,
- Plastika Trček TPU Flex 89A,
- Recreus Filaflex 82A,
- Recreus Filaflex 70A.

4.3.1 Fillamentum Flexfill TPE 90A

Filamentum Flexfill TPE 90A je fleksibilan filament za izradu 3D printanih dijelova sa velikom razinom savitljivosti i kemijskom otpornosti. Ovaj Flexfill ima matiranu površinu koja mu omogućuje bolje prianjanje prvog sloja te omogućuje izradu modela ugodnih na dodir. Također, materijal je otporan na habanje i siguran je pri kontaktu sa kožom i hranom. [7]

Karakteristike materijala[7]:

- fleksibilnost i elastičnost,
- siguran pri kontaktu s kožom i hranom,
- otporan na udarce,

- otpornost na habanje,
- otporan na vodu,
- otporan na kiseline, alkohole i lužine.

Zbog svojih korisnih karakteristika ovaj materijal ima širok spektar primjena, od inženjerskih, medicinskih do raznih drugih namjena. [7]

Postavke za 3D ispis propisane od strane proizvođača[7]:

- preporučena temperatura za 3D ispis: 225-245 °C,
- preporučena brzina za 3D ispis: 15 – 25 mm/s,
- preporučena temperatura grijane radne podloge: 50-60 °C.

4.3.2 Recreus Filaflex SEBS

Recreus Filaflex SEBS je jak i izdržljiv TPE materijal koji je na bazi gume te se nakon istezanja vraća u svoj prvobitni oblik bez deformiranja ili lomljenja. Ova vrsta filamenta zbog svojih karakteristika je idealni tehnički materijal za industrijsku primjenu. [8]

Karakteristike materijala[8]:

- tvrdoća od 90A Shore-a,
- otpornost na kemikalije i oksidirajuća sredstva,
- otpornost na visoke temperature,
- otpornost na UV zračenje,
- otpornost na kišu,
- fleksibilan i izdržljiv materijal,
- široka primjena materijala,
- visoka razina detalja,
- izvrsna završna obrada,
- alternativa PVC materijalu.

SEBS ima širok spektar primjene i upotrebe te se najčešće koristi u industrijskom području. Materijal se odličan za proizvodnju fleksibilnih spojeva, izolacijskih elemenata, elemenata za pomorsku upotrebu, te dijelovima izloženim zahtjevnome okruženju. [8]

Postavke za 3D ispis propisane od strane proizvođača[8]:

- preporučena temperatura za 3D ispis: 240-260 °C,
- preporučena brzina za 3D ispis: 20-40 mm/s,
- preporučena temperatura grijane radne podloge: 50-60°C,
- brzina retrakcije: 40-60 mm/s s udaljenosti 2-3mm,
- visina sloja: 0,25-0,35 mm.

4.3.3 Plastika Trček TPU Flex 89A

Materijal koji je vrlo savitljiv te odličnih svojstva napravljen za FFF/FDM tehnologiju ispisa. Materijal je specifičan po svojstvu savitljivosti i elastičnosti zbog čega ima širok spektar primjene. [6]

Karakteristike materijala[6]:

- visoka savitljivost,
- mekan i ugodan na dodir,
- izdržljiv i otporan na udarce,
- visoka adhezija među slojevima,
- visoka vlačna čvrstoća.

Postavke za 3D ispis propisane od strane proizvođača:

- preporučena temperatura za 3D ispis:230-250°C,
- preporučena brzina za 3D ispis: 10-30 mm/s,
- preporučena temperatura grijane podloge: 20-60°C.

4.3.4 Recreus Filaflex 82A

Recreus FilaFlex je elastični filament na bazi poliuretana s tvrdoćom od 82A shore-a, što znači da prije pucanja materijal se može rastegnuti do 650% te se nakon istežanja vraća u svoj prvobitni oblik bez deformiranja i pucanja. [10]

Karakteristike materijala[10]:

- savitljiv,
- mekan i ugodan na dodir,

- izdržljiv i otporan na udarce,
- visoka adhezija među slojevima,
- visoka vlačna čvrstoća.

Postavke za 3D ispis propisane od strane proizvođača [10]:

- preporučena temperatura za 3D ispis: 215-250°C,
- preporučena brzina za 3D ispis: 20-60mm/s,
- preporučena temperatura grijane radne podloge: 20-40°C.

4.3.5 Recreus Filaflex 70A

Recreus Filaflex 70A je elastičan TPE (termoplastični elastomer) na bazi poliuretana, njegova su svojstva slična silikonu. Materijal je tvrdoće 70A shore-a, to jest materijal prije pucanja se može rastegnuti i do 900%, to jest nakon istezanja se vraća u svoj izvorni oblik bez lomljenja ili deformiranja. Filament Recreus Filaflex 70A se zbog njegove visoke funkcionalnosti najčešće koristi u ortotici, protetici, tekstilnoj te u automobilskoj industriji. [11]

Karakteristike materijala[11]:

- široka primjena,
- izrazito žilav i elastičan,
- istezanje i do 900%,
- idealan za dijelove koji moraju biti mekani i izdržljivi,
- sadrži svojstva sličnom silikonu.

Postavke za 3D ispis propisane od strane proizvođača[11]:

- preporučena temperatura za 3D ispis: 215-235°C,
- preporučena brzina za 3D ispis: 20-40 mm/s,
- preporučena temperatura grijane radne podloge:20-40°C.

4.4 Korištena oprema

U svrhu ispitivanja mehaničkih svojstva materijala i izrade testnih uzoraka i epruveta korišteni su sljedeći uređaji: Uređaj za 3D ispis Prusa i3MK3S+, kidalica Shimadzu AG-X, uređaj za ispitivanje tvrdoće Zorn Stendal DDR.

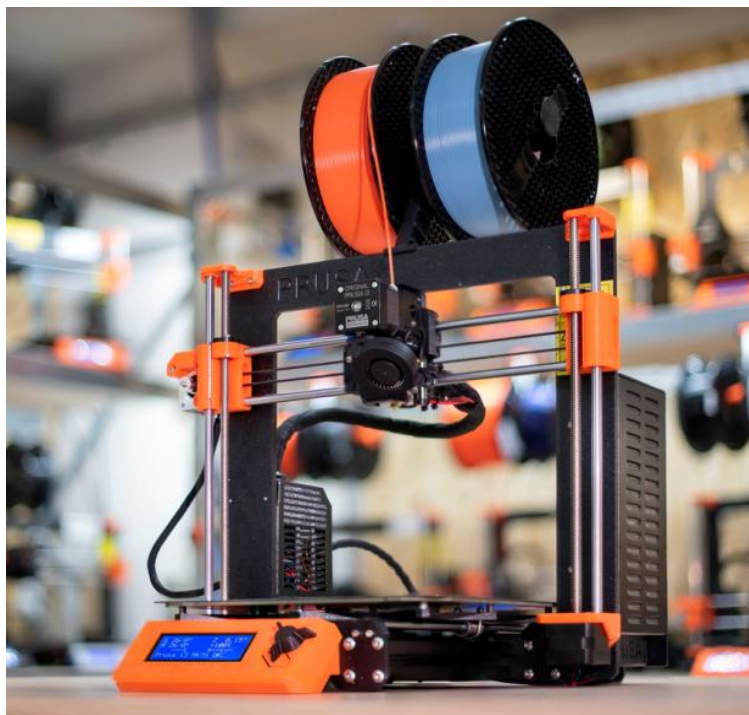
4.4.1 Uređaj za 3D ispis Prusa i3MK3S+

Printer koji je nekoliko godina za redom bio najtraženiji 3D printer na svijetu, nažalost se prestao proizvoditi 29. veljače 2024. Prusa i3 MK3S+ je nasljednik već nagrađivanog Prusa MK2S. S izmjenama na ekstruderu, mnoštvo senzora, magnetskom grijanom podlogom, te zamjenjivim PEI čeličnom radnom podlogom. [12]

Tehničke karakteristike[12]:

- radni volumen: 250x210x210 mm,
- visina sloja: 0,05-0,35 mm,
- mlaznica: 0,4 mm, postoje i druge vrste mlaznica u različitim dijametrima i materijala,
- dijametar filameta: 1,75 mm,
- materijali za 3D ispis koje Prusa i3 MK3S+ podržava: termoplastični materijali svih vrsta, PLA, PETG, ASA, ABS, PC, Flex, HIPS, Nylon,
- maksimalna brzina ispisa: 200+ mm/s,
- maksimalna temperatura mlaznice: 300 °C,
- maksimalna temperatura radne podloge: 120°C,
- ekstruder: Direct Drive, Bondtech Gears, V6 hotend,
- radna podloga: magnetska metalna podloga sa različitom površinskom hrapovošću,
- dimenzije printera: 500x550x400 mm ; 7 kg – bez špule,
- snaga: PLA postavke-80W ; ABS postavke-120W.

Na slici 17. prikazan je uređaj za 3D ispis Prusa i3MKs+.



Slika 17. Prusa MK3S+ [12]

4.4.2 Kidalica Shimadzu AG-X plus-100kN

Shimadzu AG-X plus je precizna univerzalna numerički upravljiva kidalica za ispitivanje mehaničkih svojstva metala, polimera i keramike. Kidalicom se upravlja pomoću programskog paketa Trapezium X. Trapezium X omogućava provođenje ispitivanje, zapisivanja rezultata u elektronskom obliku te dobivanje Hookova dijagrama na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem materijala. [13]

Karakteristike SHIMADZU AG-X plus kidalice[13]:

- mjerno područje: 100kN,
- ispitivanje: vlak, tlak i savijanje,
- ispitivanje plosnih epruveta 0-21 mm (100/50kN),
- ispitivanje okruglih epruveta D4-D24 (100/50 kN).

Na slici 18. prikazana je kidalica SHIMADZU AG-X plus.



Slika 18. Kidalica SHIMADZU AG-X

4.4.3 Uređaj za ispitivanje tvrdoće Zorn Stendal DDR

Stacionarni uređaj za ispitivanje tvrdoće prema Shore A na elastomerima, proizvodima od prirodne gume, lijevanim smolama, poliesterima, plastificiranom PVC-u, neopremu, koži i sličnim materijalima. Za shore A čelična igla ima oblik krnjeg stošca, ona se utiskuje u materijal za ispitivanje. Količina otpora prodiranja je naznačena sa kazaljkom na mjernoj skali. [14]

Metoda je standardizirana prema DIN 53505, ASTM D 2240, BS 903. [14]

Na slici 19. prikazan je uređaj za mjerenje tvrdoće gume.

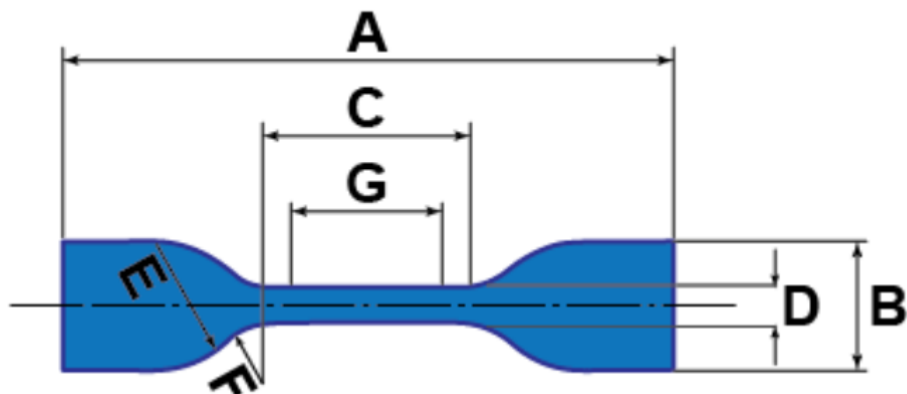


Slika 19. Uređaj za ispitivanje tvrdoće Zorn Stendal DDR

4.5 Uzorci za ispitivanje

Za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala izrađenu su epruvete po ISO 37 standardu. ISO 37 utvrđuje metodu za određivanje svojstva vlačne čvrstoće i deformacije vulkanizirane i termoplastične gume. Ovaj ispitni standard je ekvivalentan BS ISO 37. Brzina ispitivanja kod standarda ISO 37 ovisi o tipu epruveta, to jest dimenzijama. Kod tipa 1, 1A u 2 brzina ispitivanja je 500mm/min, a kod tipa 3 i 4 je 500 mm/min. Standardna debljina epruvete za tip 1, 1A, 2 ,3 je 2mm, a za tip 4 je 1mm. Za testiranje koristi se epruvetu tipa 1A i debljine 2 mm te brzinu ispitivanja iznosi 500 mm/min. [15]

Na slici 20. prikazane su dimenzije epruvete za standard ISO 37.



Dumbbell test gauge length

Dumbbell type and nominal die dimensions (mm)

Test piece type	Type 1	Type 1A	Type 2	Type 3	Type 4
Overall length (A)	115	100	75	50	35
Width of end tab (B)	25	25	12.5	8.5	6
Length of narrow section (C)	33	21	25	16	12
Width of narrow section (D)	6.2	5	4	4	2
Transition outside radius (E)	14	11	8	7.5	3
Transition inside radius (F)	25	25	12.5	10	3
Test 'gauge' length (G)	25	20	20	10	10

- Standard thickness for type 1, 1A, 2, 3 shall be 2.0 mm; for type 4: 1.0 mm.

Slika 20. Dimenzije epruveta za ISO 37 [15]

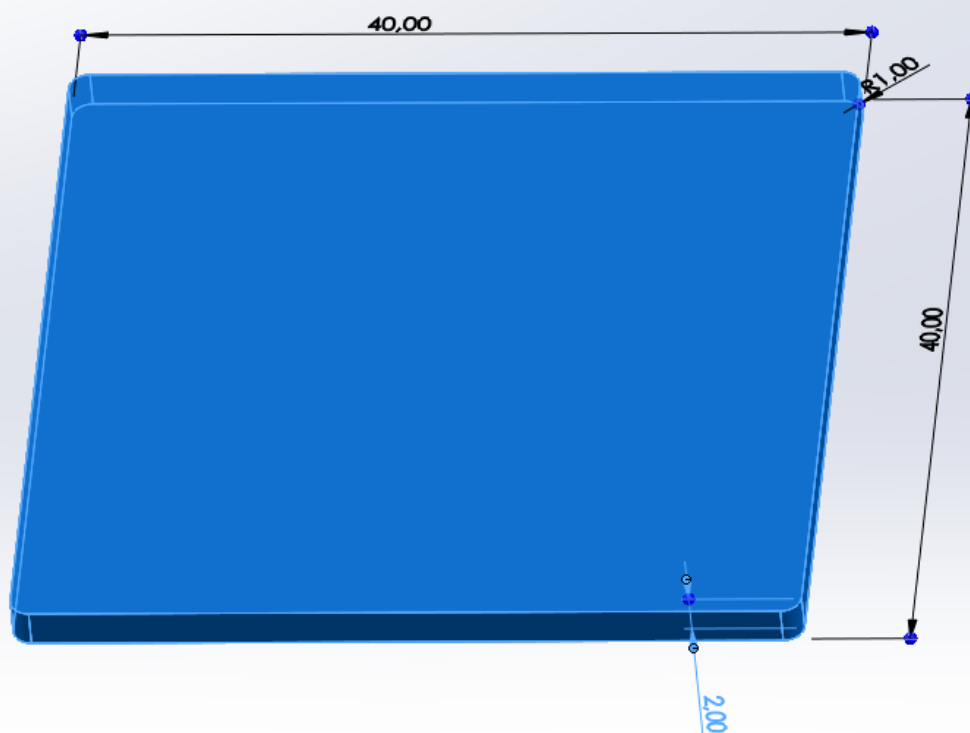
$$a = 5 \text{ mm}$$

$$b = 2 \text{ mm}$$

$$S_0 = 10 \text{ mm}^2$$

Za ispitivanje tvrdoće gume koristit će se postupak Shore A, prema ISO 868 standardu. Ova metoda ispitivanja koristi durometar za mjerenje otpornosti na utiskivanje elastomernih ili mekih plastičnih materijala nakon primjene sile na stožasti utiskivač. Oblik udubljivača varira ovisno o mekoći materijala koji se ispituje. Durometar A ima udubljivač oblika krnjeg stošca i prikladan je za mekše materijale(meke plastike i gume), dok durometar D ima šiljasti vrh i prikladan je za tvrđe materijale (tvrde plastike i gume). Kada su rezultati durometra A veći od 90, preporuča se korištenje D. Kada testovi D imaju rezultate manje od 20, preporuča se promjena za A. [16]

Metoda dopušta mjerenje ili početnog udubljenja ili udubljenja nakon određenog vremenskog razdoblja ili oboje. Na slici 20. nalaze se dimenzije testnih uzorka za mjerenje tvrdoće prema Shore A postupku. [16]



Slika 21. Dimenzije testnih uzoraka za ispitivanje tvrdoće

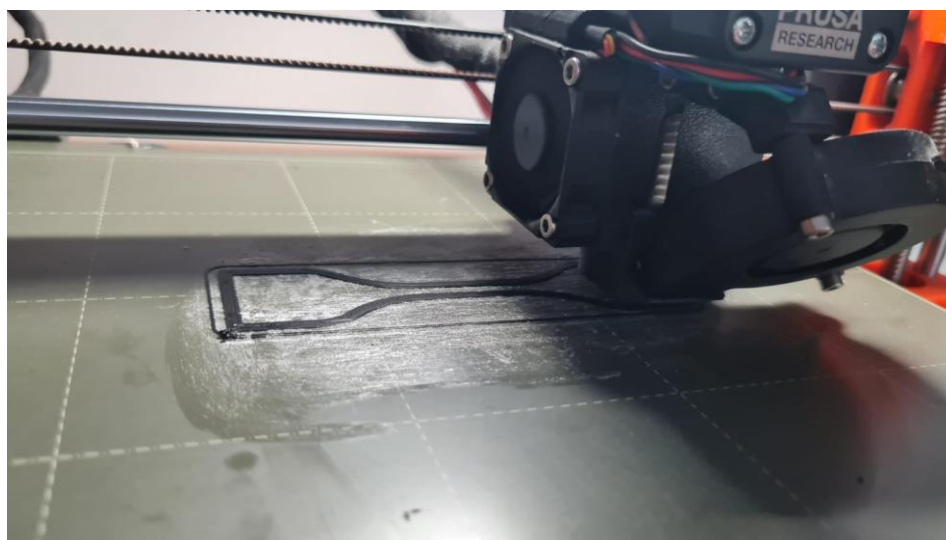
Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće i uzorci za ispitivanje tvrdoće prema Shore metodi izrađeni su FDM postupkom te se u tablici 1. nalaze parametri ispisa za određene materijale. Na slici 22. prikazano je početak izrade epruvete za vlačno ispitivanje, a na slici 23. prikazana je gotova epruveta, s time da epruveta sadrži brim, potrebna je dodatna obrada. Na slici 24. prikazane su pripremljene epruvete za vlačno ispitivanje.

Tablica 1. Postavke za 3D ispis

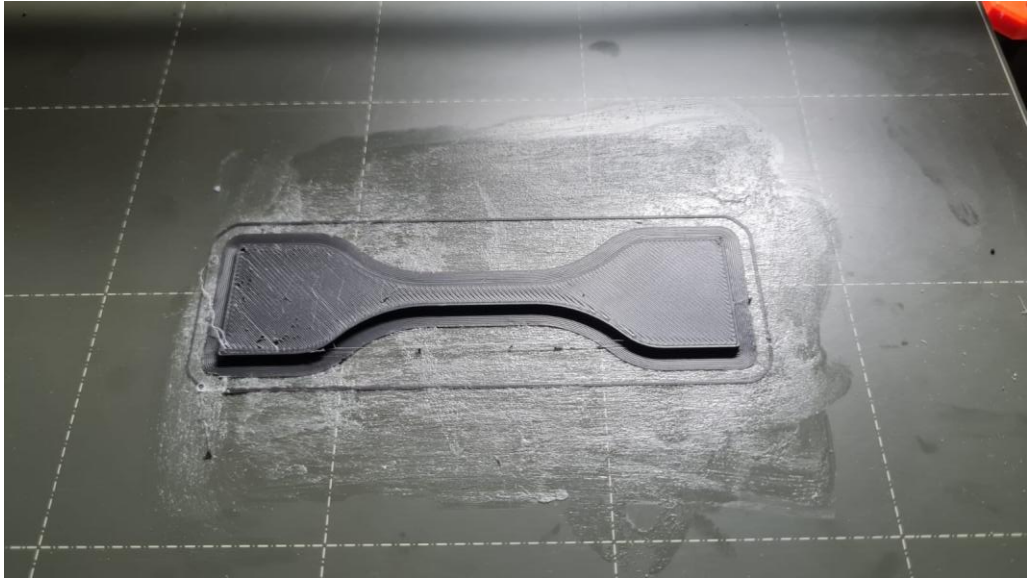
POSTAVKE					
MATERIJAL	TPE 90A	SEBS	TPU 89A	TPU 82A	TPU 70A
VISINA PRVOG SLOJA	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
VISINA SLOJA	0,2 mm	0,3 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
ISPUNJENOST	100%	100%	100%	100%	100%
TIP ISPUNE	rectilinear	rectilinear	rectilinear	rectilinear	rectilinear
ŠIRINA BRIM-a	5mm	2 mm	1 mm	1 mm	2 mm
BRZINA ISPISA	25 mm/s	40 mm/s	40 mm/s	40 mm/s	40 mm/s
T.M.N.P.S	245°C	260°C	245°C	250°C	235°C
T.M.N.O.S	240°C	255 °C	245°C	240°C	230°C
TEMPERATURA "BED-a"	50°C	60 °C	50°C	50°C	50°C
RETRAKCIJA	3 mm	2 mm	3 mm	5 mm	4 mm/s
BRZINA RETRAKCIJE	20 mm/s	50 mm/s	30 mm/s	40 mm/s	40 mm/s

T.M.N.P.S - temperatura mlaznice na prvom sloju

T.M.N.O.S - temperatura mlaznice na ostalim slojevima



Slika 22. Izrada epruvete u početnoj fazi



Slika 23. Izrađena epruveta



Slika 24. Primjer pripreme epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće

4.6 Ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje se provodi na univerzalnoj kidalici, gdje se epruveta kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Prilikom ispitivanja kontinuirano se mjere sile i produljenja epruvete. Brzina ispitivanja prilikom izvođenja ispitivanja iznosi 500 mm/min, a početna duljina epruvete se mjeri unutar čeljusti (pakni) i unosi se u program.

Nakon loma svake epruvete, program je očitao odgovarajuće produljenje za sile opterećenja te je očitana i maksimalna sila. Od svakog materijala ispitano je po 5 epruveta, a dobiveni rezultati su ispisani u tablicama, te su iskorišteni za izračun vlačne čvrstoće i modula elastičnosti.

Vlačna čvrstoća se računa prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \text{N/mm}^2 \quad (1)$$

Gdje je :

R_m - vlačna čvrstoća; N/mm²

F_m - maksimalna sila opterećenja; N

S_0 - površina početnog poprečnog presjeka, mm²

Naprezanje pri prekidu se računa prema izrazu:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \quad \text{N/mm}^2 \quad (2)$$

Gdje je:

R_k - granica loma; N/mm²

F_k - konačna sila; N

S_0 - površina početnog poprečnog presjeka; mm²

Vrijednost istežanja nakon loma epruvete određuje se izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad \text{mm/mm} \quad (3)$$

Gdje je:

ε - istezanje; mm/mm

ΔL_u - produljenje; mm

L_0 - početna duljina epruvete; mm

Konačno postotno produljenje ili istezljivost:

$$A = \frac{\Delta L_u}{L_0} \times 100\% \quad (4)$$

Gdje je:

A - istezljivost; %

ΔL_u - produljenje; mm

L_0 - početna duljina epruvete; mm

Modul elastičnosti se određuje sljedećim izrazom:

$$E = \frac{R_e}{\varepsilon} \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

Gdje je:

E - modul elastičnosti; N/mm²

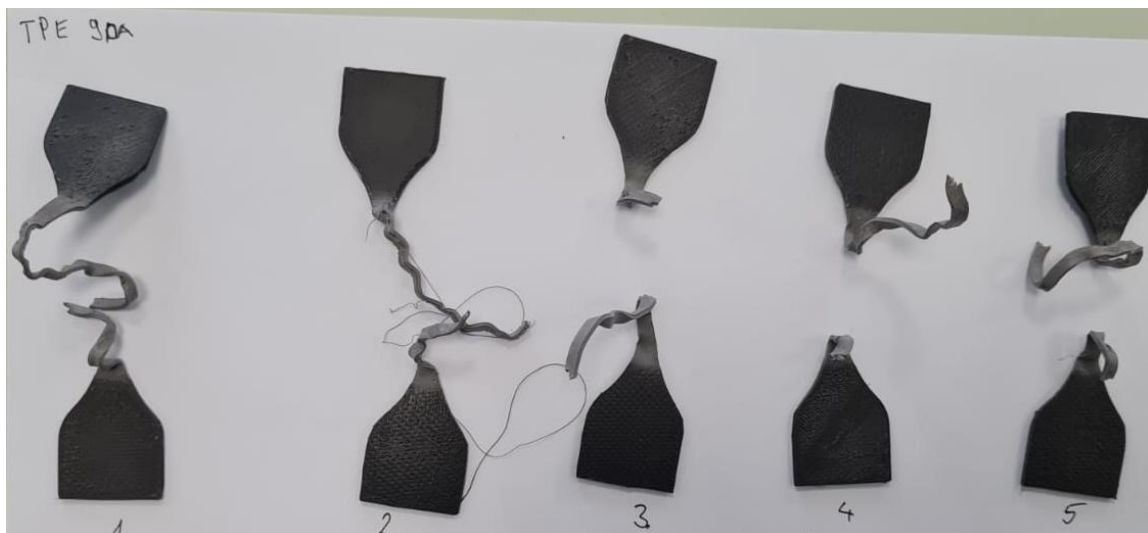
R_e – granica razvlačenja; N/mm²

ε - istezanje; mm/mm

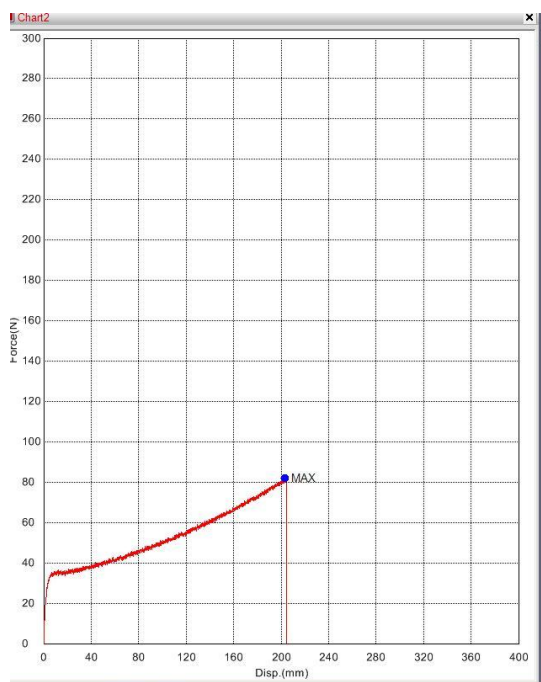
Teorijska granica razvlačenja R_e teško se određuje, stoga rabimo takozvanu konvencionalnu granicu razvlačenja, a to je ono naprezanje koje nakon rasterećenja na epruveti prouzroči trajnu deformaciju od 0,1 %. Kod materijala koji nemaju izraženu granicu, nego imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnosti u područje trajnih deformacija, konvencionalnu granicu razvlačenja određujemo s pomoću $R_{p0,2}$. To je ono naprezanje koje uzrokuje trajnu deformaciju epruvete od 0,2%. $R_{p0,2}$ se određuje grafički.

4.6.1 Rezultati ispitivanja - TPE 90A

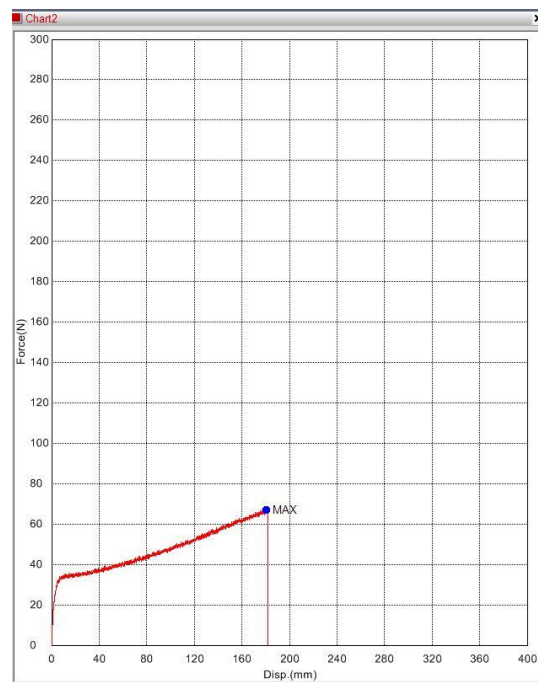
Na slici 25. su prikazane prekinute epruvete od TPE 90A, a na slikama 26. i 27. prikazani su primjeri dijagrama sile/produljenja za epruvetu 1 i 2.



Slika 25. Epruvete od TPE 90A nakon provedenog ispitivanja



Slika 26. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 1



Slika 27. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 2

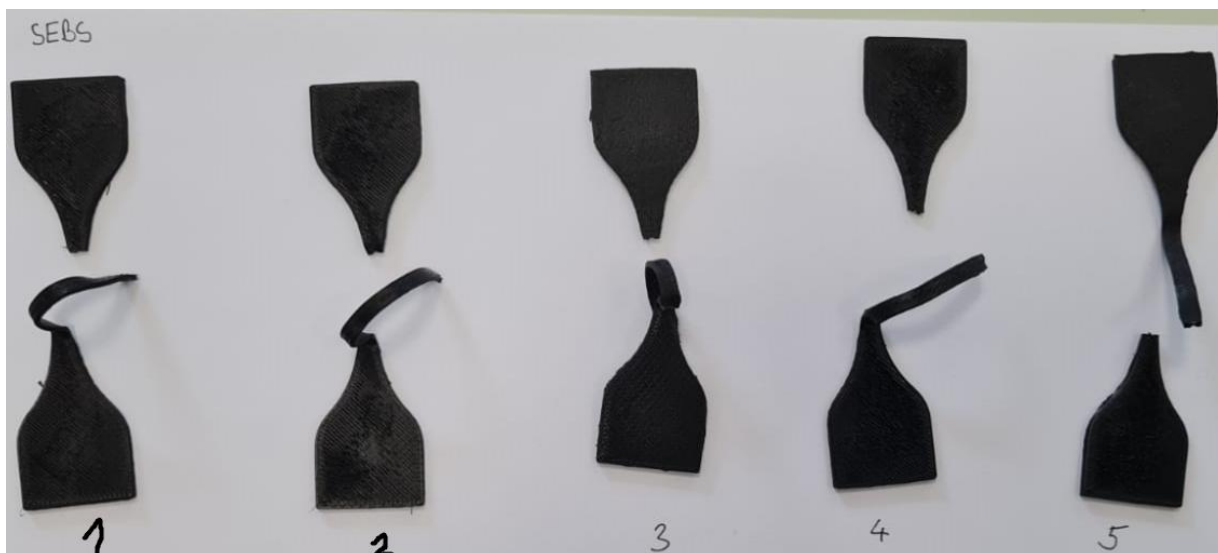
U tablici 2. nalaze se mehanička svojstva za materijal TPE 90A dobivena vlačnim ispitivanjem.

Tablica 2. Mehanička svojstva

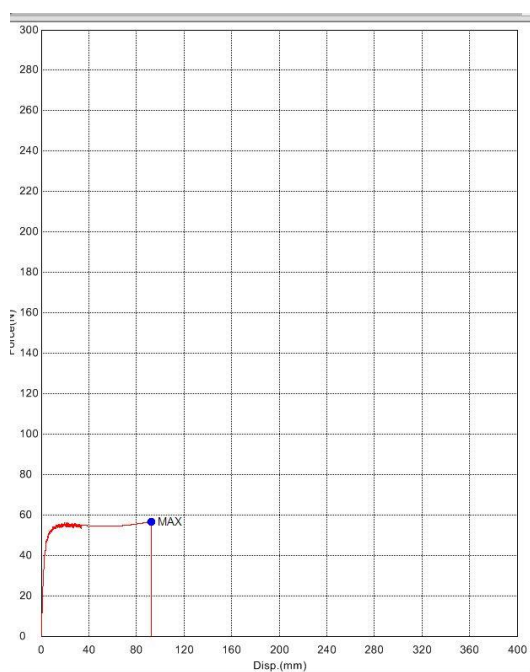
TPE 90A								
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja (R_{Po2}) MPa	Vlačna čvrstoća (R_m) MPa	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPa	Produženje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa
1	82,0478	82,0478	3,33	8,20478	8,20478	203,546	4,71062	16,65
2	67,1546	67,1546	3,16	6,71546	6,71546	180,713	4,09408	15,8
3	67,9811	67,9811	2,97	6,79811	6,79811	176,046	4,3138	14,85
4	61,4325	61,4325	2,99	6,14325	6,14325	169,713	3,71363	14,95
5	71,0646	71,0646	3,51	7,10646	7,10646	175,379	3,96517	17,55

4.6.2 Rezultati ispitivanja – SEBS

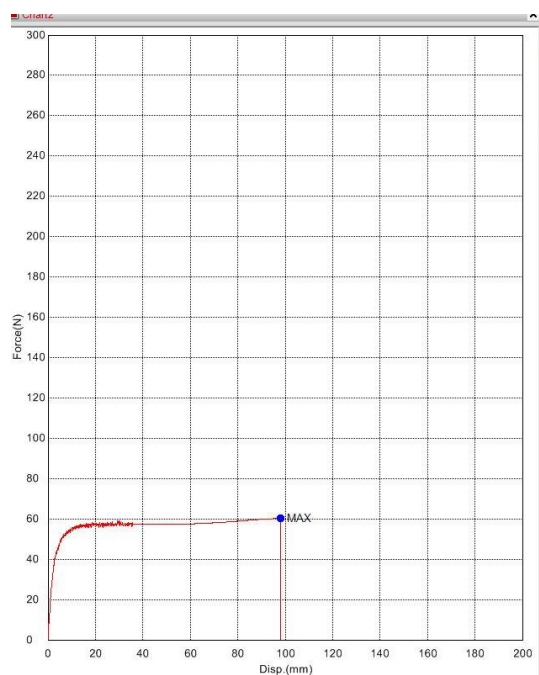
Na slici 28. su prikazane prekinute epruvete od SEBS, a na slikama 29. i 30. prikazani su primjeri dijagrama sile/produljenja za epruvetu 1 i 2.



Slika 28. Epruvete od SEBS nakon provedenog ispitivanja



Slika 29. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 1



Slika 30. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 2

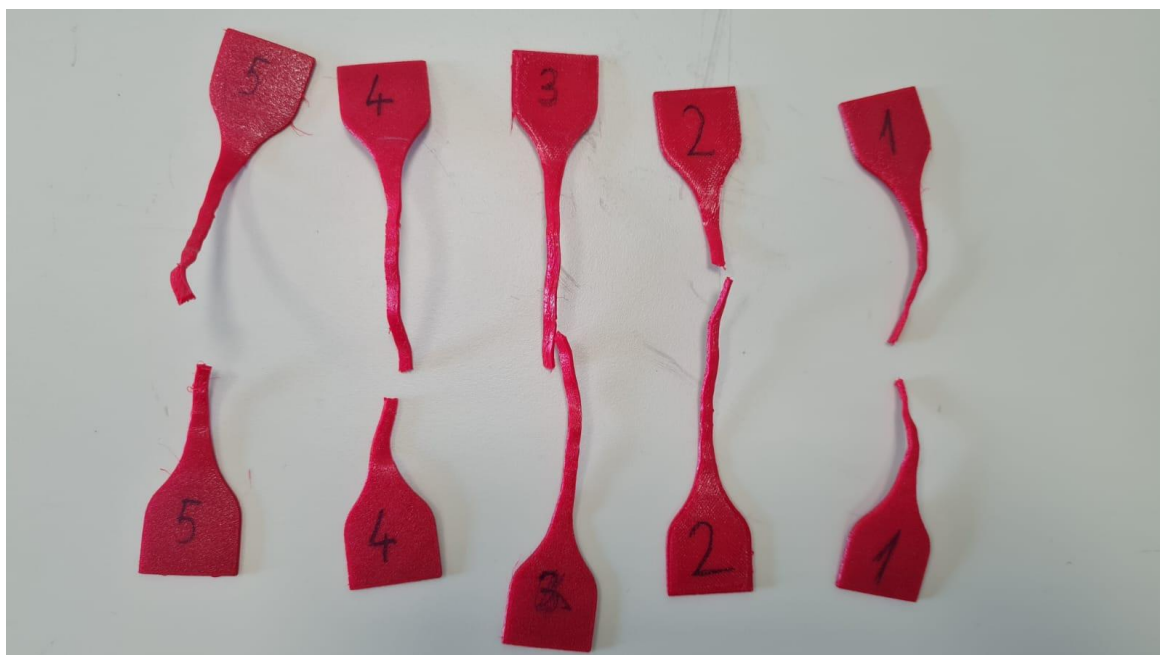
U tablici 3. nalaze se mehanička svojstva za materijal SEBS dobivena vlačnim ispitivanjem.

Tablica 3. Mehanička svojstva

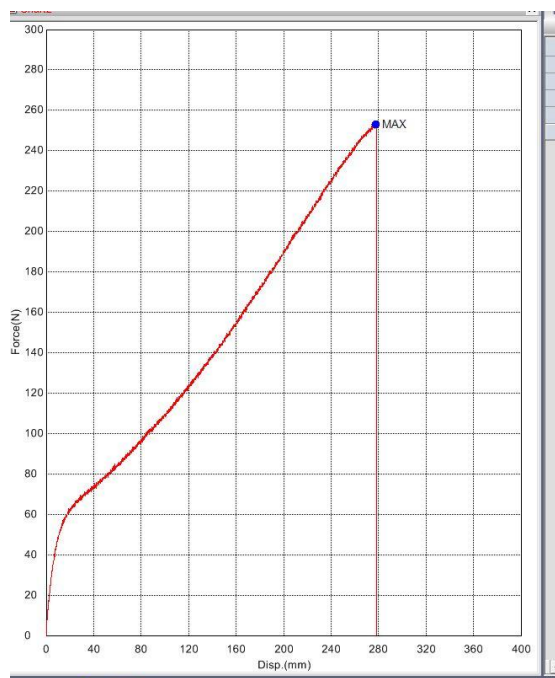
SEBS								
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila lomna (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) MPa	Vlačna čvrstoća (R_m) MPa	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPa	Produljenje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa
1	56,3304	56,3304	4,85	5,63304	5,63304	92,7129	1,9243	24,25
2	60,304	60,304	4,88	6,0304	6,304	97,8795	2,01315	24,4
3	58,6987	58,6987	4,86	5,86987	5,86987	25,2131	0,464501	24,3
4	57,1728	57,1728	4,69	5,71728	5,71728	95,3796	2,09074	23,45
5	61,2736	61,2736	5,17	6,12736	6,12736	75,713	1,63739	25,85

4.6.3 Rezultati ispitivanja – TPU 89A

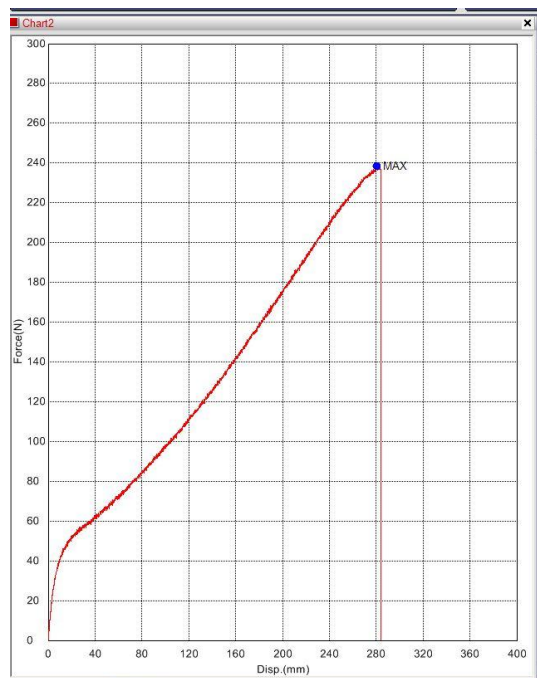
Na slici 31. su prikazane prekinute epruvete od TPU89A, a na slikama 32. i 33. prikazani su primjeri dijagrama sile/produljenja za epruvetu 1 i 2.



Slika 31. Epruvete od TPU 89A nakon provedenog ispitivanja



Slika 32. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 1



Slika 33. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 2

U tablici 4. nalaze se mehanička svojstva za materijal TPU89A dobivena vlačnim ispitivanjem.

Tablica 4. Mehanička svojstva

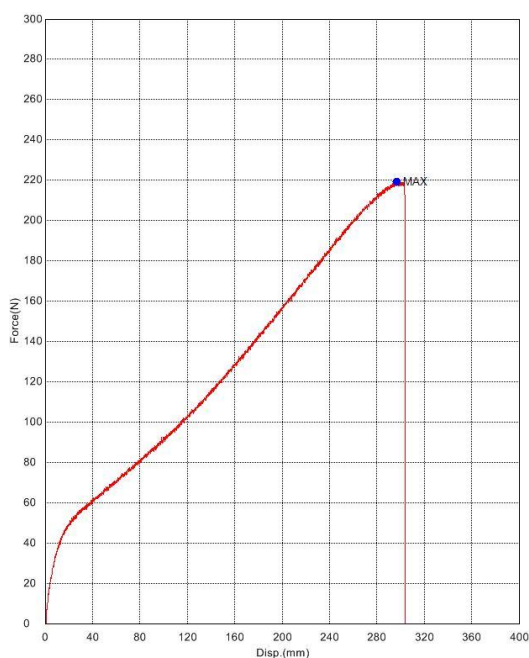
TPU 89A								
Epruveta	Maksimalna sila (Fm) N	Sila loma (Fk) N	Konvencionalna granica razvlačenja (Rp _{0,2}) MPa	Vlačna čvrstoća (Rm) MPa	Naprezanje pri prekidu (Rk) MPa	Produljenje ΔL mm	Istezanje ε mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa
1	253,232	253,232	3,24	25,3232	25,3232	277,962	6,77957	16,2
2	238,641	238,641	2,88	23,8641	23,8641	280,629	6,10063	14,4
3	242,678	242,678	3,22	24,2678	24,2678	280,629	6,68164	16,1
4	235,748	235,748	3,02	23,5748	23,5748	284,212	6,45937	15,1
5	303,904	303,904	3,37	30,3904	30,3904	331,379	7,05061	16,85

4.6.4 Rezultati ispitivanja – TPU 82A

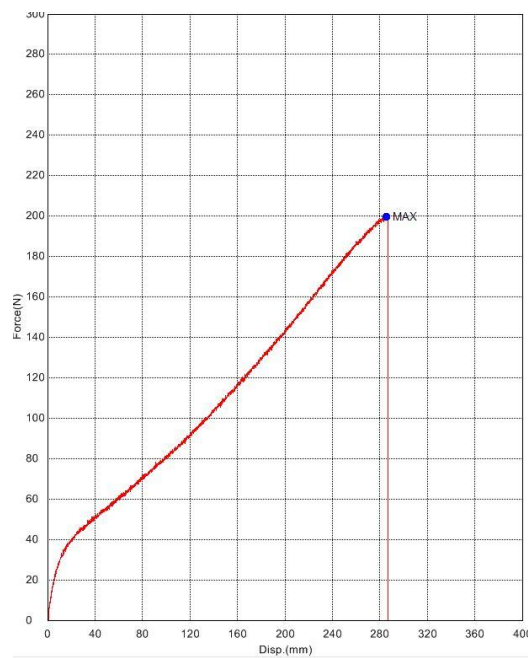
Na slici 34. su prikazane prekinute epruvete od TPU 82A, a na slikama 35. i 36. prikazani su primjeri dijagrama sile/produljenje za epruvetu 1 i 2.



Slika 34. Epruvete od TPU 82A nakon provedenog ispitivanja



Slika 35. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 1



Slika 36. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 2

U tablici 5. nalaze se mehanička svojstva za materijal TPU 82A dobivena vlačnim ispitivanjem

Tablica 5. Mehanička svojstva

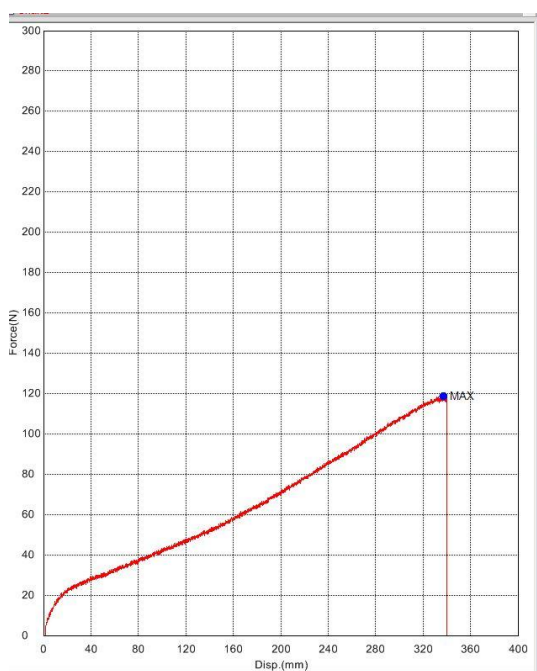
TPU 82A								
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_b) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0.2}$) MPa	Vlačna čvrstoća (R_m) MPa	Naprezanje pri prekidu (R_b) MPa	Produljenje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa
1	219,266	219,266	2,4	21,9266	21,9266	296,462	7,4488	12
2	199,715	199,715	2,11	19,9715	19,9715	285,712	6,36614	10,55
3	214,211	214,211	2,29	21,4211	21,4211	298,129	6,90113	11,45
4	220,903	220,903	2,17	22,0903	22,0903	307,379	6,79441	10,85
5	232,744	232,744	2,3	23,2744	23,2744	311,796	7,58996	11,5

4.6.5 Rezultati ispitivanja – TPU 70A

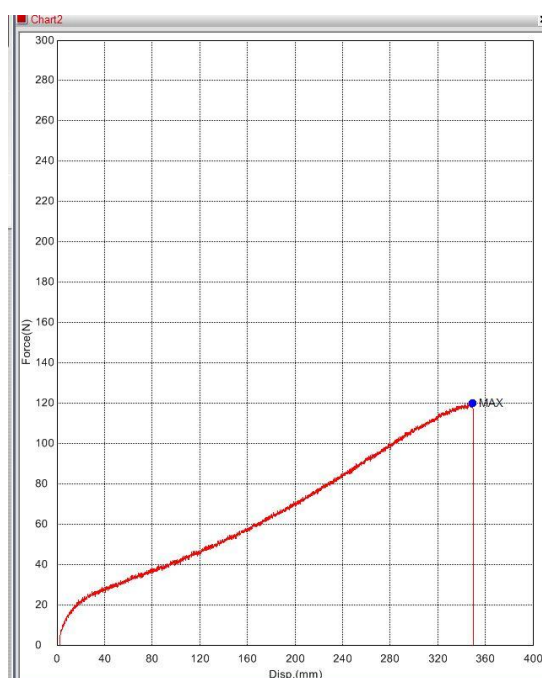
Na slici 37. su prikazane prekinute epruvete od TPU82A, a na slikama 38. i 39. prikazani su primjeri dijagrama sile/produljenje za epruvetu 1 i 2.



Slika 37. Epruvete od TPU 70A nakon provedenog ispitivanja



Slika 38. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 1



Slika 39. Dijagram sile / produljenje za epruvetu 2

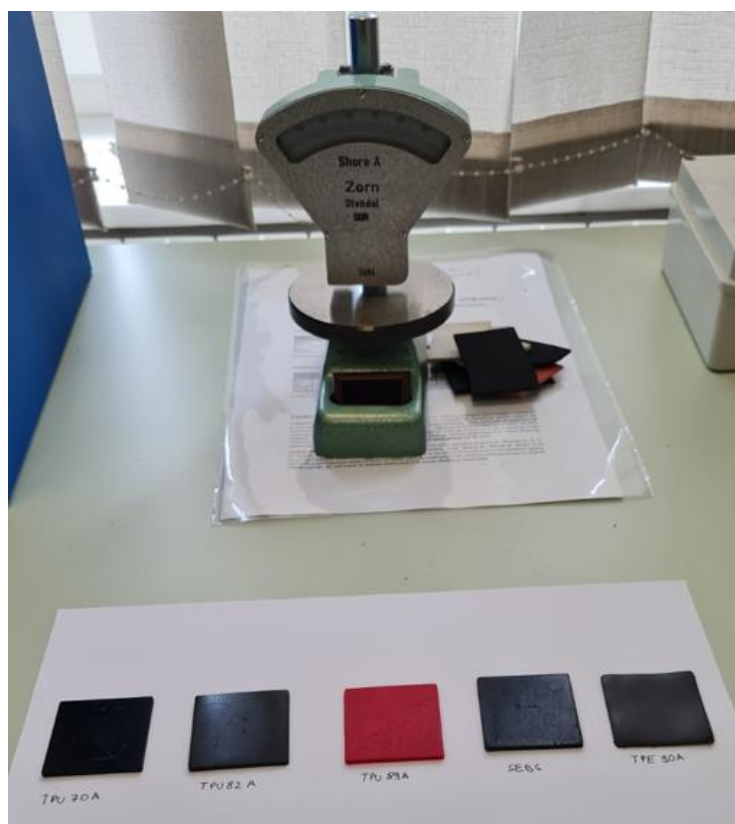
U tablici 6. nalaze se mehanička svojstva za materijal TPU 70A dobivena vlačnim ispitivanjem

Tablica 6. Mehanička svojstva

TPU 70A								
Epruveta	Maksimalna sila (F_m) N	Sila loma (F_k) N	Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0.2}$) MPa	Vlačna čvrstoća (R_m) MPa	Naprezanje pri prekidu (R_k) MPa	Produženje (ΔL) mm	Istezanje (ϵ) mm/mm	Youngov modul elastičnosti (E) MPa
1	118,526	118,526	0,83	11,8526	11,8526	337,295	9,77667	4,15
2	119,909	119,909	1,26	11,9909	11,9909	349,212	8,07613	6,3
3	129,207	129,207	0,82	12,9207	12,9207	361,545	8,17791	4,1
4	97,7039	97,7039	0,67	9,77039	9,77039	375,045	8,15316	3,35
5	151,857	151,857	0,96	15,1857	15,1857	412,212	8,47649	4,8

4.7 Rezultati ispitivanja tvrdoće po Shoreovoj metodi

Na slici 40. je prikazan uređaj za mjerenje tvrdoće Zorn Stendal DDR i testni uzorci.



Slika 40. Pripremljeni uzorci za ispitivanje tvrdoće

U tablici 7. prikazani su dobiveni rezultati ispitivanja tvrdoće po Shoreovoj metodi.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja

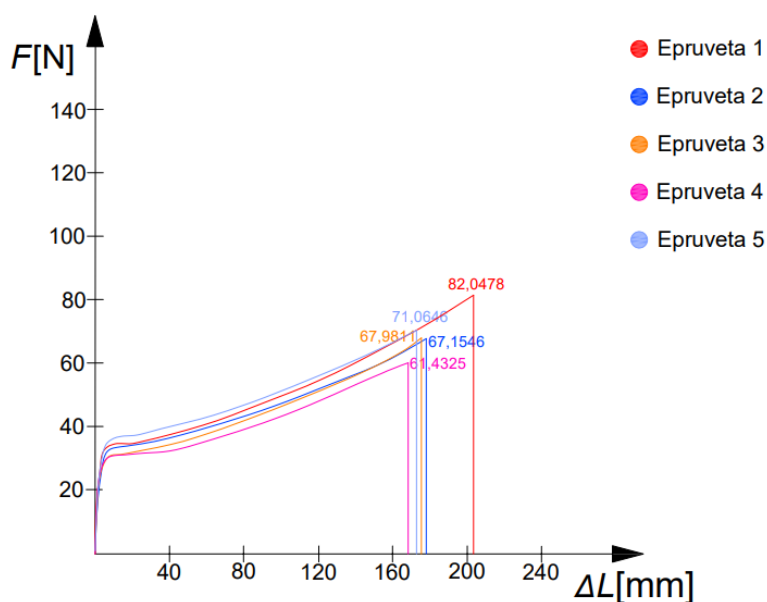
MATERIJAL	SEBS	TPE90A	TPU 89A	TPU 70A	TPU 82A
TVRDOĆA PO SHOREOVOJ METODI	85A	86A	85A	72A	83A

5.0 ANALIZA REZULTATA

Dobiveni rezultati su očekivani, pošto se radi o podskupinama elastomera, koji posjeduju svojstvo istezljivosti materijala. Najveću istezljivost materijala ima „najmekši“ materijal TPU 70A, zatim slijede TPU 82A, TPU 89A, TPE 90A, a najmanju istezljivost materijala ima SEBS. F_m (maksimalna sila) i F_k (sila loma) dijele istu točku kod svih ispitanih materijala, onda istu točku dijele R_m i R_k , što je i očekivano. Najveću F_m , F_k , R_m i R_k ima TPU 89A, zatim slijede TPU 82A, TPU 70A, TPE 90A, a najmanju F_m i F_k ima SEBS. Kada se izračuna modul elastičnosti, dobije se da najveći modul elastičnosti ima SEBS, zatim slijede TPE 90A, TPU 89A, TPU 82, a najmanji modul elastičnosti ima TPU 70A.

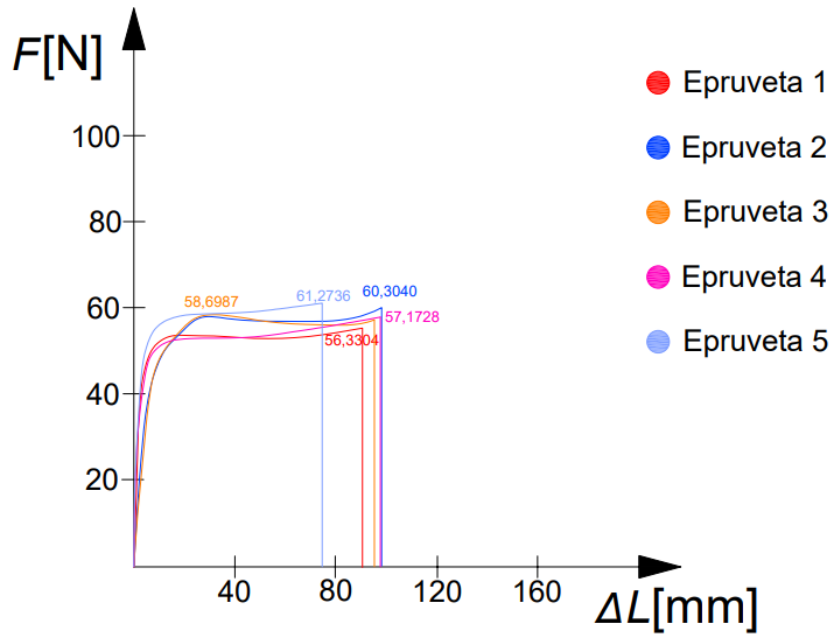
Na slikama su prikazani objedinjeni dijagrami sile/produljenja od svake epruvete za svaki materijal.

TPE 90A



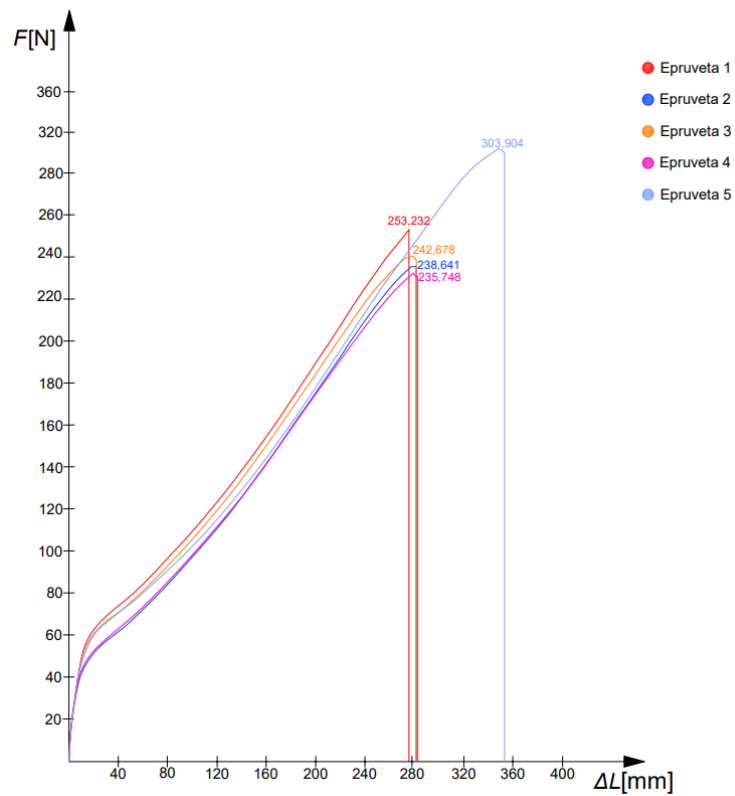
Slika 41. Dijagram sila / produljenje za TPE 90A

SEBS

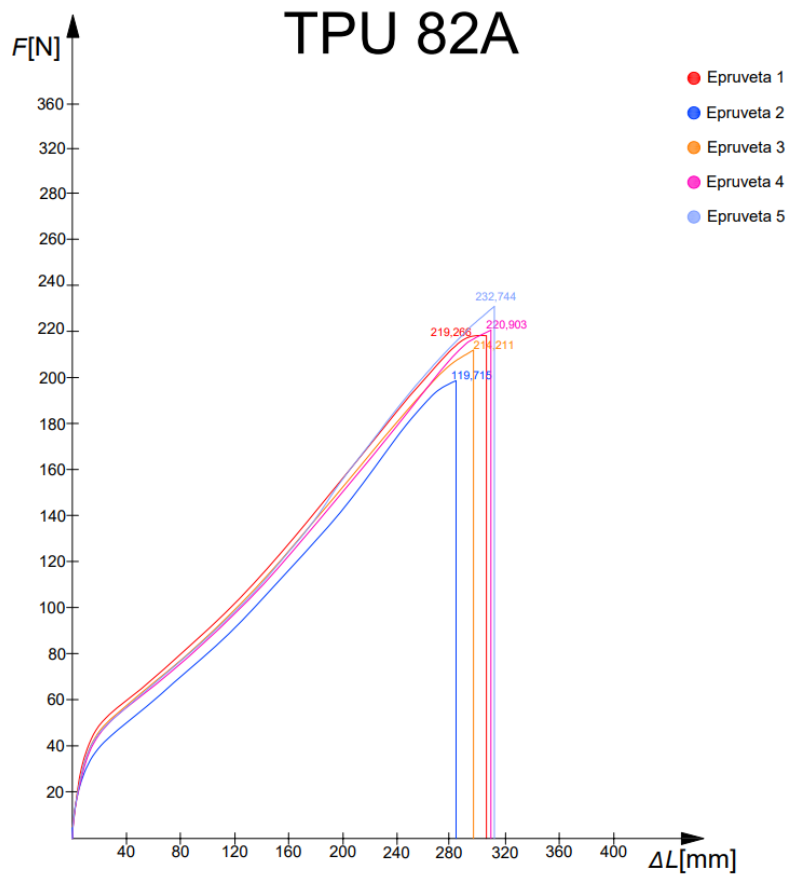


Slika 42. Dijagram sila / produljenje za SEBS

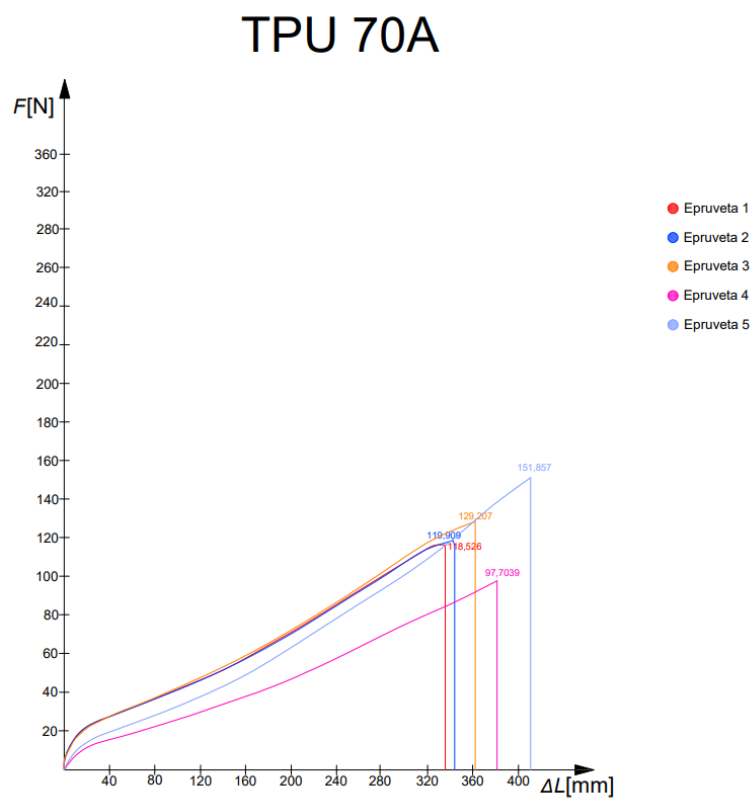
TPU 89A



Slika 43. Dijagram sila / produljenje za TPU 89A



Slika 44. Dijagram sila / produljenje za TPU 82A



Slika 45. Dijagram sila / produljenje za TPU 70A

Tablica 8. Mehanička svojstva ljudske sluznice [17]

LJUDSKA SLUZNICA		
Dijelovi usne šupljine	Youngov modul elastičnosti (E) MPA	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA
Gingiva	37,36 ($\pm 17,36$)	3,81 ($\pm 0,94$)
Tvrdo nepce	18,13 ($\pm 4,51$)	1,7 ($\pm 0,87$)
Obraz (sluznica)	8,33 ($\pm 5,78$)	1,54 ($\pm 0,52$)

Usporedivši E (modul elastičnosti) i R_m (vlačnu čvrstoću) ispitanih materijala sa E (modulom elastičnosti) i R_m (vlačnom čvrstoćom) dijelova usne šupljine (Tablica 8.) može se vidjeti kako su ispitani materijali unutar granica modula elastičnosti za pojedine dijelove usne šupljine. Međutim, vlačna čvrstoća navedenih materijala odstupa, odnosno mjerenja dobivena ispitivanjem su veća.

Prema modulu elastičnosti dijelovi usne šupljine odgovaraju sljedećim ispitanim materijalima:

- Gingiva – SEBS
- Tvrdo nepce – TPE90A i TPU89A
- Obraz (sluznica) – TPU 82A i TPU70A

Dobivene i izračunate vrijednosti za E (modul elastičnosti) i R_m (vlačna čvrstoća) korištenih materijala u svrhu ispitivanja pokazuju odstupanja u odnosu na mjerenja iz tehničkih listova, osim za TPE 90A. Mogući razlog toga je da je materijal upio vlagu, te se slojevi nisu dovoljno dobro „spojili“.

Propisane tvrdoće ispitanih materijale u ovom radu pokazuju manja odstupanja od rezultata iz tehničkih listova (Tablica 9.). Mogući razlog toga je debljina po ISO 868 iznosi minimalno 6,3 mm, dok je uzorak izrađen sa debljinom od 2mm, zbog toga da se prikaže točna vrijednost tvrdoće epruvete koja se vlačno ispituje.

Tablica 9. prikazuje mehanička svojstva materijala ispitana od strane proizvođača.

Tablica 9. Mehanička svojstva korištenih materijala ispitana od strane proizvođača

Materijal	Vlačna čvrstoća (R_m) MPA	Youngov modul elastičnosti (E) MPA	Tvrdoća
Flexfill TPE 90A	> 5	/	90 A
Filaflex SEBS	/	83 (ISO 527)	90 A (ISO 7619-1)
Trček TPU 89A	45 (ASTM D638)	/	89 A (ISO 868)
Filaflex 82 A	45 (DIN 53504-S2)	22 (ISO 527)	/
Filaflex 70 A	32 (DIN 53504-S2)	/	/

6.0 ZAKLJUČAK

Postupci aditivne tehnologije su još uvijek relativno novi kod postupaka izrade modela, ali razvijen je velik broj metoda izrade prototipa za manje, srednje i velike serije. Uz svakodnevni napredak tehnologije, napredovali su materijali i tehnologija 3D ispisa (printanja). Njihova dostupnost je sve veća i veća pa se sve više tvornica i pojedinaca odlučuje za kupnje uređaja. Kako je navedeno u tekstu, svakodnevno tehnologija napreduje, a tako napreduju i uređaji za 3D ispis te je prisutnost u industriji sve veća. Isto se može reći i za područje medicine, gdje je ova vrsta tehnologije pomaže u liječenju.

Fleksibilni materijali koji se koriste u FDM postupku mogu zamijeniti neke dijelove usne šupljine, ali potrebno je prilagoditi postavke 3D ispisa, kao što su: tip ispunjenosti, flow ratio, temperaturu ispisa i visinu sloja. Spomenuto također ovisi i koliko precizno je z os stroja podešena. Veliki ulogu kod slaganja „sloja na sloj“ kod FDM-a ima i postotak vlage u prostoriji i u filamentu kao i starost filameta.

Razvoj računalne tehnologije, alata i materijala će dodatno utjecat na aditivnu tehnologiju, koja će svojim razvojem znatno ubrzat razvoj drugih tehnologija te utjecat na kvalitetu života.

LITERATURA

- [1] Godec D., Šerčer M.: *Aditivna proizvodnja*; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.
- [2] Wohlers T., Garnett T.: *History of additive manufacturing*; Wohlers Associates; INC., 2014
- [3] Wohlers T.: *Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry*; Wohlers Associates, INC.
- [4] Godec, D., Šerčer M.: *Značaj aditivnih postupaka proizvodnje tvorevina u suvremenom razvoju i proizvodnji*; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2013
- [5] Kraut B.: *Krautov strojarski priručnik*, Sajema; Zagreb, 2009.
- [6] https://facfox.com/docs/kb/comparison-between-tpu-tpc-tpa-and-soft-pla#ch_1 (20.3.2024)
- [7] https://shop3duniverse.com/products/kimya-peba-s-1-75mm-500gtranslucent?_pos=637&_sid=38138e17a&_ss=r#v45605424365888 (20.6.2024)
- [8] https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/filamentum-flexfill-tpe-90a/?_gl=1*gc091e*_up*MQ..&_gclid=CjwKCAjwps-zBhAiEiwALwsVYS8P0DshhT56RAmaYUXIMCJLztFN-NnPlpV7xmyx7zmlnjz_0lIH4hoC6VcQAvD_BwE (20.6.2024)
- [9] https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/recreus-filaflex-sebs/?_gl=1*fmswl*_up*MQ..&_gclid=CjwKCAjwm_SzBhAsEiwAXE2CvwyhrINd9pu5WvnAi15ISO5YurPNpd8FBK3HxuQBVueGz3srVUc8hoCSVEQAvD_BwE (20.6.2024)
- [10] https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/recreus-filaflex-82a-250g/?_gl=1*q22kl9*_up*MQ..&_gclid=CjwKCAjwm_SzBhAsEiwAXE2CvwyhrINd9pu5WvnAi15ISO5YurPNpd8FBK3HxuQBVueGz3srVUc8hoCSVEQAvD_BwE (20.6.2024)
- [11] https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/recreus-filaflex-500-g/?_gl=1*171b42q*_up*MQ..&_gclid=Cj0KCQjww5u2BhDeARIsALBuLnOfzxacn7RtrNBkjqzYEtbj40JsUysgsRK4Lssk1NCSklrYs0TxAQaAtfsEALw_wcB (20.6.2024)
- [12] <https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/original-prusa-i3-mk3s/> (20.6.2024)
- [13] <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/autograph-precision-universal-tester/index.html> (22.8.2024)
- [14] http://smart-systems.su/files/modules/items/159/ru/smart_systems_zorn_instruments_tverdomer_shore_d.pdf (22.8.2024)

- [15] <https://www.mecmesin.com/standard/iso-37> (22.8.2024)
- [16] https://industrialphysics.com/standards/iso-868/?srsltid=AfmBOooT6cH3PYg9tX31nDzKeJSYfbqXfk08oelzIPAQ2J-0qW_5AZOL (22.8.2024)
- [17] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cre2.305> (22.5.2024)
- [18] Zdenko K.: Pregled građe glave, vrata i leđa; Medicinski fakultet sveučilišta u Rijeci; Zagreb,1999
- [19] <https://hemed.hr/Default.aspx?sid=17310> (22.8.2024)
- [20] <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/d7d92b59-0fd1-421d-83bc-590dfc53da86/biologija-8/m05/kazalo-multimedije/index.html> (22.8.2024)
- [21] <https://my.clevelandclinic.org/health/body/24972-gums> (22.8.2024)
- [22] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-Stereolithography-SLA-process-Image-courtesy-of-3D-Systems_fig2_331313275 (18.6.2024)
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-SLS-process_fig1_320133732 (18.6.2024)
- [24] https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-laminated-object-manufacturing-LOM-process_fig4_330633243 (18.6.2024)
- [25] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-FDM-process-10_fig6_355947590 (18.6.2024)
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-selective-laser-melting-SLM-process_fig1_326891428 (18.6.2024)