

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Брза израда прототипова

Број индекса: 414/2017

Владимир Г. Милосављевић

Композитни материјали за 3Д штампу, израда, моделирање

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Ненад Грујовић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да овлада техником израде композитних материјала ојачаних влакнима применом FDM метода 3Д штампе. Израдити узорке и епрувете и спровести механичка испитивања. Извршити нумеричку анализу МКЕ модела и упоредити резултате са подацима добијеним експериментом. Описане поступке применити на реализованој реалној структури.

НАПОМЕНА: Дефинисање теме и задатака овог рада је, на основу исказане потребе индустрије, урађено у сарадњи са стручњацима из Института IMW и AMM (Milanović Industries Group – MIND Group).

Препоручена литература:

[1] Трајановић М., Грујовић Н., Миловановић Ј., Миливојевић В., Рачунарски подржане брзе производне технологије, Машински факултет у Крагујевцу, Центар за информационе технологије, 2008

[2] Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н., Метод коначних елемената I, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010

Крагујевац, мај 2019.

ментор:

Др Ненад Грујовић, редовни професор

Садржај

1.	Увод	7
2.	Композитни материјали	8
2.1	Утицај влакана на оријентацију	11
2.2	Коришћени материјали за израду композитног материјала	11
3.	3D штампа	12
3.1	Стереолитографија - SLA.....	12
3.2	Селективно ласерско синтеровање - SLS	16
3.3	Тродимензионално штампање 3DP	18
3.4	Моделирање депоновањем истопљеног материјала	20
3.4.1	Радни параметри FDM штампе	21
4.	FDM штампа композитних материјала	23
4.1	Комерцијално доступни композитни материјали за 3D штампу	23
4.1.1	Филаменти ојачани угљеничним влакнима	23
4.1.2	Филаменти ојачани дрвеним влакнима.....	24
4.1.3	Композитни филаменти ојачани металним честицама.....	25
4.1.4	Електропроводљиви филаменти	25
4.2	Нека решења израде композитних филамената за 3D штампу	26
5.	Израда сопственог композитног материјала и механичка испитивања	30
5.1	Израда филамента за 3D штампу	30
5.2	Израда узорака	32
5.3	Механичка испитивања.....	35
5.4	Резултати	37
6.	Мори – Танака хомогенизација микрокомпозита	40
7.	Нумеричка анализа.....	42
8.	Практична примена	46
9.	Закључак.....	48
10.	Литература	49

Композитни материјали за 3Д штампу, израда, моделирање

Резиме

У оквиру овог мастер рада представљена је техника израде композитних материјала ојачаних сецканим влакнима применом *FDM* тродимензионалне штампе. Извршена је израда композита екструдирањем, његова тродимензионална штампа, па испитивање на истезање, потом нумеричка анализа модела са два материјала и једним, добијеним применом Мори – Танака методе за хомогенизацију композита, ради поређења са експерименталних резултата. Резултати свих испитивања су показали поклапање резултата у еластичној зони, док су нумерички прорачуни показали добро поклапање са експерименталним резултатима.

Кључне речи: *FDM* штамп, композитни материјали, Мори-Танака, експериментално испитивање

Composite materials for 3D printing, fabrication, modeling

Abstract

The main subject of this thesis of master's program is technique of making composite materials reinforced with chopped fibers by using 3D printing method. It is done by making extrusion processing of two materials, and its three-dimensional printing, then fabrication and testing of tensile specimens were conducted. Numerical analysis of two models, one modeled with two materials, and one modeled using Mori – Tanaka composite homogenization method, and its comparison with experimental results. Results of all of the mentioned methods have shown matching results with the elastic zone while numeric calculations have displayed proper match with experimental results.

Keywords: *FDM* printing, composite materials, Mori-Tanaka, experimental test

Захваљујем се ментору проф. др Ненаду Грујовићу на корисним саветима, примедбама и смерницама током израде овог мастер рада.

Такође, изразио бих захвалност колегама из Центра за информационе технологије и колегама из Центра за инжењерски софтвер и динамичка испитивања Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, на пруженој несебичној помоћи при изради овог рада као и на стављању на располагање комплетне мерно – техничке опреме, потребне за спровођење механичких испитивања.

1. Увод

Композитни материјали ојачани влакнима су у широкој употреби због њихових изузетних својстава, ниске густине, високих затезних чврстоћа и модула еластичности. Тиме је настала потреба да се конвенционални материјали могу заменити савременијим. Због овако добрих карактеристика, композитни материјали су уведени у скоро сваку грану индустрије у неком облику или начину.

Један од начина израде композитних материјала јесте тродимензионална штампа. Свака нова технологија има своје време и еру интересовања. Тако је све више примера разних „чуда“ која су могућа захваљујући концепту тродимензионалног штампања. Добро је позната популарност према комбинацији брзих производних технологија и композитних материјала.

Композит који ће овде бити израђен јесте састављен од матрице ABS-а (акрилонитрил бутadiен стирен) и ојачања силка (флуорокарбон). Влакно које ће служити као ојачање ће бити исецкано. Биће приказана израда филамента који ће се користити при тродимензионалном штампању.

Након израде филамента, биће описан процес штампе епрувете тип IV према стандарду за методе тестирања затезних својстава пластика ASTM D638 као и њено експериментално испитивање.

Након експерименталног испитивања подаци добијени експериментом ће бити употребљени за спровођење нумеричке анализе методом МКЕ.

На крају самог рада биће представљен и експериментално испитан један од примера практичне примене оваквих видова израде композитних модела.

2. Композитни материјали

Велика чврстоћа, а мала маса јесу неке од особина које композитне материјале чини јако занимљивим за истраживање и развој. Композитни материјал или једноставније композит је састављен од два или више материјала, који заједно као једна целина раде на добијању бољих механичких карактеристика, у односу на њихово првобитно тј. одвојено стање, али не долази до међусобног растварања и мешања материјала [1].

У пракси, композитни материјал се састоји од матрице и ојачања, где то ојачање игра улогу у побољшању механичких карактеристика. Одабиром одређених врста матрице и ојачања као и производног процеса који их спаја, може се прилагодити својство материјала тако да одговарају специфичним захтевима. Тако у неким случајевима композитни материјал може имати бољу топлотну проводљивост или електрични отпор [1].

Класификација композитних материјала према пореклу матрице јесте [1]:

- синтетичке (керамика, полимер, карбон, метал),
- природне (лигнин, колаген).

Синтетички композити са полимером, металном или керамичком матрицом имају међусобно различиту структуру, физичко – механичка својства и могућност примене (Табела 1)

Табела 1. Нека својства појединих материјала [2]

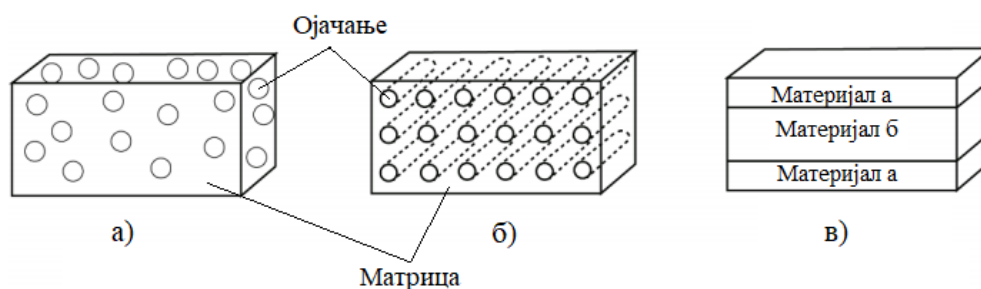
Својства	Метали	Полимери	Керамике
Тачка топљења [°C]	200-3500	70-200	2000-4000
Топлотна проводљивост	висока	ниска	средња
Затезна чврстоћа[МПа]	100-2500	30-300	10-400
Модул еластичности[GPa]	40-400	0.7-3.5	150-450
Електрична проводљивост	висока	ниска	ниска

Било који материјал може служити као матрица али се за материјале матрице код композита узимају керамика, метали и полимери. У пракси, највећу примену као матрица имају полимери. Постоје више врста полимера које се користе а неки од тих полимера јесте термопластика.

Термопластика је материјал који се може растопити. Када дође до температуре топљења материјала, пластика омекша довољно да би се она могла преобликовати. Када се извор топлоте уклони, температура пластике се спусти испод тачке топљења па пластика очврсне и остане у прерађеном облику. Овај процес се може понављати али је ограничен јер може доћи до промене својства материјала [3]. Неки од материјала који се данас користе јесу: **ABS** (енг. *Acrylonitrile Butadiene Styrene*), **PLA** (енг. *Polylactic Acid*), **најлон** итд.

Подела композита према врсти ојачања се може свести на (Слика 1) [3]:

- композити ојачани честицама,
- композити ојачани влакнима,
- ламинатни композити.

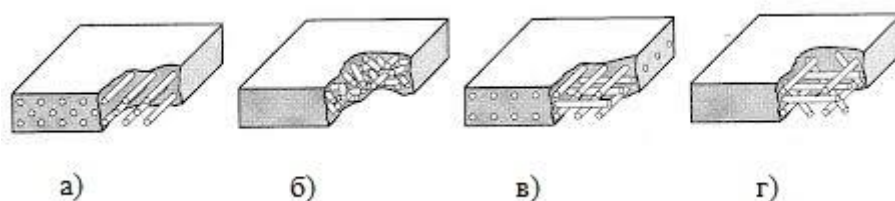


Слика 1. Композитни материјали према типу ојачања: а) композитни материјали ојачани честицама, б) композитни материјали ојачани влакнима, в) ламинатни композити [3]

Композити ојачани честицама, састоје се од матрице где су смештене честице различитих облика али се може рећи да су они приближно истих димензија у свим правцима. Запремински удео игра улогу колико ће се карактеристике материјала променити. Како би се остварило ојачање неки од услова који морају бити испуњени јесу да честице морају бити равномерно распоређене и величина честица мора бити мања од $1\mu\text{m}$ у пречнику.

Код композита ојачаним влакнима, до њиховог стварања се долази тако што се влакно имплементира у меку матрицу. Матрица преноси силу са влакна на влакно, обезбеђује жилавост и пластичност и способност обликовања, док влакна преносе оптерећење. Влакна могу бити истих или различитих дужина и распореда што знатно утиче на својства композита.

Влакна могу бити: кратка, произвољно оријентисана, дуга у једном правцу, дуга у два међусобно управна правца и дуга, испреплетана и произвољно оријентисана (Слика 2). У овом раду осврт ће бити на кратка произвољно оријентисана влакна [4].



Слика 2. Типови влакана и њихова оријентација а) дуга у једном правцу, б) кратка, произвољно оријентисана, в) дуга у два међусобно управна правца и г) испреплетана и произвољно оријентисана [4]

Са повећањем запреминског удела влакана расту његова чврстоћа и крутост. За производњу влакана се користе стакло, угљеник, бор и арамид.

У овом раду биће описане карактеристике кратких произвољно оријентисаних влакана. Ови композити могу имати случајну или жељену оријентацију влакана. Главна предност кратких влакана јесте лака израда самог композита уколико се треба поредити са континуалним дугим влакнима где је њихова израда доста тежа и захтевнија. Иако дуга влакна дају боље механичке карактеристике од кратких влакана, композити правилно направљени увек показују боља својства од чистих полимера па је увек боље

ојачати их чак и кратким влакнима. То повлачи да је композит јефтинији у односу на полимер осим када су у питању карбонска влакна са високим перформансама [4].

За сваки материјал и сваку врсту напрезања у области Хуковог закона, постоје одређени односи између напона и њима изазваних деформација. Код напрезања на затезање, притисак и савијање овај однос дат је модулом еластичности. Напон је пропорционалан деформацији [5]:

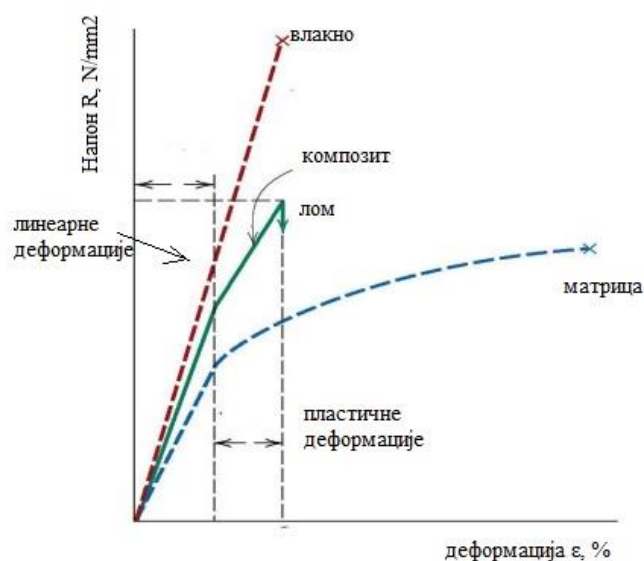
$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.1)$$

где је σ - нормални напон, E – модул еластичности, а ε - релативно издужење. Наведени израз, у математичком смислу, представља једначину праве ($y = k * x$) у којој је модул еластичности коефицијент правца линеарног дела криве. Па је :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \equiv \operatorname{tg} \alpha \quad (2.2)$$

где је α - угао нагиба линеарног дела криве затезања.

Тако је дат дијаграм зависности нормалног напона σ од релативног истезања ε (Слика 3).



Слика 3. Дијаграм напон – деформација [6]

На дијаграму су дате области линеарне и пластичне деформације. У овом раду ће се посматрати само линеарне деформације, односно еластична зона материјала. Еластична зона се дефинише као својство материјала које се након престанка дејства силе материјал врати у почетни положај.

2.1 Утицај влакана на оријентацију

Употреба влакана са што мање могућим пречником даје најмању површину, па самим тим и мали број површинских грешака које могу бити иницијатори кртог лома. Вlakна са већом дужином су боља јер крајеви влакана преносе мањи део оптерећења него остатак влакана. Технолошки је веома тешко произвести дуга влакна и спаковати их у матрицу. За разлику од дугих, кратка влакна се веома лако спајају са матрицом, али стварају релативно слабо ојачавање. Како би се обезбедио неопходни ниво ојачања, а самим тим и повећала крутост влакнасто ојачаних композитних материјала, неопходно је да употребљена влакна имају минимално такозвану критичну дужину [5].

Оријентација влакана се дели на:

- произвољне оријентације влакана,
- једносмерно уређена влакна.

Произвољно оријентисана влакна са малим односом дужине и пречника понашају се изотропно али се са њима не могу постићи оптимална механичка својства. Вlakнасто оријентисани композитни материјали са једносмерном оријентацијом влакана, ако оптерећење делује у правцу влакана, постижу се оптималне вредности чврстоће и крутости. Уколико оптерећење делује управно на правац влакана, вредности чврстоће и крутости су знатно мање. Па су влакнасто ојачани композитни материјали са једносмерном оријентацијом влакана анизотропни [5].

Материјал влакана треба да има добру чврстоћу, крутост и малу масу. За композите који се користе на повишеним температурама, ојачавајућа влакна морају имати високу температуру топљења. Материјали који се највише користе за производњу влакана су: стакло, угљеник, бор, арамид, најлон итд.

2.2 Коришћени материјали за израду композитног материјала

Сам композит је направљен од два материјала. За материјал матрице је коришћен Акрилонитрил бутатиен стирен (ABS). За материјал ојачања је коришћен флуокарбонска рибарска струна. ABS је непозиран термопластични и аморфни полимер. Каже се да је термопластичан јер се приликом загревања, до одређене температуре, топи и постаје течан. Може се загрејати до тачке топљења, охладити и поново загрејати без значајног пропадања. Самим тим има велику предност у рециклирању за разлику од такозваних термосетова, где поновно загревање није могуће јер долази до тога да материјал почиње да гори [7].

Овај материјал има снажну отпорност на корозивне хемикалије и/или физичке утицаје. Релативно је јефтин у односу на цене других полимера. Релативно је безопасан, нема никакве познате карциногене или дуге познате нежељене ефекте на здравље.

Због своје структурне чврстоће користи се за израду тастера на тастатурама, кућишта електричног алата, лево играчке итд. Механичке карактеристике полимера су дате у табели 2.

Табела 2. Механичке карактеристике ABS полимера [7]

Карактеристике материјала	Вредности
Температура топљења	204-210 °C
Дебљина филамента	1,75 mm
Затезна чврстоћа	25-50 МПа
Модул еластичности	2800 МПа
Поасонов коефицијент	0,35

3. 3D штампа

Тродимензионално штампање је процес превођења тродимензионалног дигиталног модела у физички модел. Овај процес превођења користи 3D штампач, односно машина која моделује дигиталну геометрију као просторно дефинисан склоп материјала. Превод прецизно дефинисаног дигиталног модела у физичку копију, нужно захтева геометријску апроксимацију заобљених углова, храпавост површине, празнине или других несавршености [8].

Аддитивна производња је термин који описује скуп технологија које стварају 3D моделе додавањем материјала слој по слој. Материјали се могу разликовати од технологије до технологије, али постоје неке заједничке карактеристике за сваку технологију, попут употребе рачунара заједно са посебним софтвером за 3D моделирање или да се модел добије тако што се скенира преко 3D скенера. Дати процес се започиње тако што се направи CAD модел. Тај модел се онда убацује у одговарајући софтер. Софтвер учитава податке које је добио од модела и гради хоризонтално танке слојеве. Ти слојеви представљају хоризонтални пресек модела. Штампачућа глава наноси градивни материјал и онда се све помери за степен вертикално, како би се нанео следећи слој. Производи који се штампају могу бити од различитих материјала, од пластике, преко керамике, до метала. Технологија се и даље развија а нови материјали, помоћу којих се штампа се уводе невероватном брзином [8].

Према стању полазног материјала, технологије се могу поделити на оне које користе материјал у течном, прашкастом, чврстом облику, листове, као и гас и атоме. Дуга подела јесте на основу методе градње физичком модела: фото – очвршћавањем, синтеровањем, топљењем, екструдирањем, штампањем, сечењем, ливењем, замрзавањем, заваривањем и распрскавањем.

Тренутне водеће технологије јесу [8]:

- стереолитографија (SLA – *Stereolithography*),
- селективно ласерско синтеровање (SLS – *Selective laser sintering*),
- тродимензионално штампање (3DP – *3D printing*),
- моделирање депоновањем истопљеног материјала (FDM – *Fused deposition modeling*).

3.1 Стереолитографија - SLA

Важи за једну од најстаријих и најфинијих техника 3D штампе. Уз помоћ ове технике могу да се одштампају врло мали и фини детаљи са савршено глатком површином која не захтева никакве додатне обраде. За градивни материјал користи фотополимер, за разлику од прашкастих испуна и филамента. На слици 4 дат је приказ

штампача који користи принцип стереолитографије као и део који је одштампан овом методом [9]:

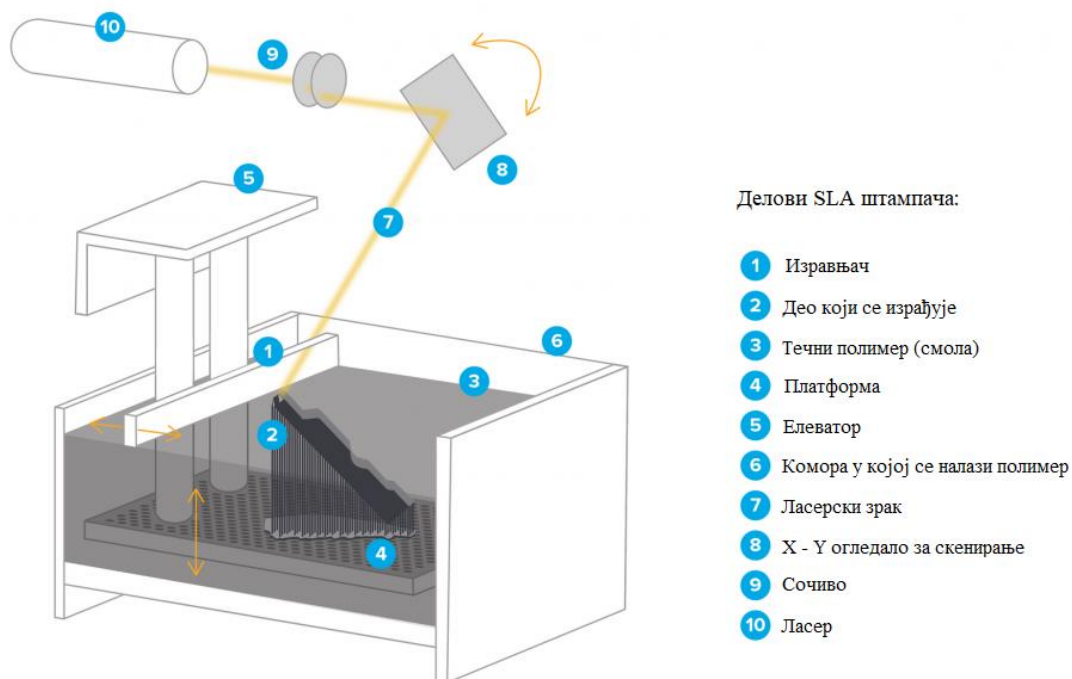


Слика 4. *SLA штампач лево, и модел израђен том технологијом десно [9]*

Извор енергије код ове методе јесте ласерски зрак који скенира површину течног мономера где се извршава фотополимеризација. Полимеризација представља повезивање малих молекула (мономера) у ланце великих молекула (полимера). Затим се ланци даље повезују где се добија укрштени полимер. Фотополимеризација је полимеризација изазвана фотохемијским процесом који је последица индукције енергије извора радијације. Снага SLA технологије лежи у томе да брзо усмерава фокусирану радијацију одговарајуће снаге и таласне дужине на површину течног мономера у складу са компјутерски генерисаним подацима о попречним пресецима дела. Ласерски зрак одређене снаге и таласне дужине се пропушта кроз телескоп за ширење зрака на пар управљаних огледала. Она формирају систем за скенирање, па се зрак фокусира на површину течног мономера очвршћавајући течност [9].

Делови система који су приказани на слици 5 јесу [10]:

- комора са течним полимером,
- покретна платформа,
- изравњивач и огледало које усмерава UV зраке,
- ласер и оптички систем за скенирање.



Слика 5. SLA поступак са компонентама система [10]

Први корак јесте пројектовање 3D модела производа. Уколико је потребно, такође треба пројектовати носећу структуру која повезује, током свих фаза израде, део који се израђује да би се повећала крутост дела како он сам не би плутао или потонуо на дно коморе [8].

Део се израђује слојевито, одозго навише, тако што се платформа спушта за висину која одговара дебљини наредног слоја. Прво је потребно подесити ниво смоле. Након тога платформа се спушта испод нивоа смоле, тако да се течност разлива у улегнуће изнад дела. Затим се део подиже да доведе свој највиши слој тачно један слој дебљине испод сечива изравњача. Изравњач уклања вишак смоле док прелази преко коморе. Платформа се поново спушта, тако да се слој уклоњене смоле доведе на ниво слободне површине у комори. Затим, ласерски зрак управљан огледалима, векторски скенира контуру попречног пресека новог слоја. Снага ласера се подешава тако да смола очврсти довољно дубоко да се споји са претходним слојем. Процес се понавља док се не направи читав део. На крају, део се подиже изнад коморе, како би смола, која није очврснула спала са дела у комору. Смола која је остала уклања се у соном купатилу. Додатно постпроцесирање дела се извршава у UV пећима за очвршћавање да би очврсла заробљена течна смола и на тај начин део добија коначни изглед. Након тога, уколико је потребно делу је потребно скинути носећу конструкцију [8].

Материјали који се користе приликом израде дела SLA технологијом јесу:

- **Акрилатне смоле** које приликом процеса делимично очвршћавају. Након завршетка процеса, готов део се обрађује излагањем UV зрачењу. Материјал је крт, па је могуће да се он пескари, боји итд. Полупровидан је.
- **Епоксидне смоле** су скоро провидне. За разлику од акрилатних смола, епоксидне не захтевају додатну накнадну обраду јер добијају велику крутост приликом саме израде. Зато је потребан мали број носача приликом израде што додатно олакшава обраду након израде [8].

Предности стереолитографије [8]:

- непрекидан рад,
- добра прецизност,
- широк избор материјала,
- могуће разне радне запремине.

Недостаци стереолитографије:

- захтева ослоње,
- захтева постпроцесирање,
- захтева накнадно очвршћавање,
- токсичан материјал.

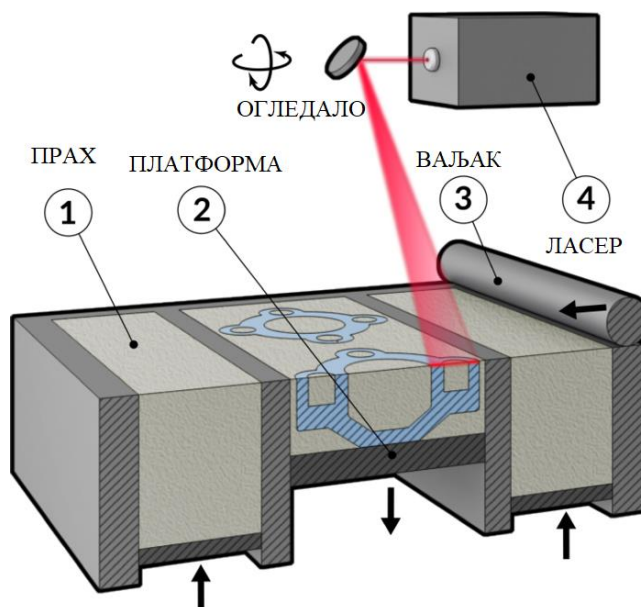
3.2 Селективно ласерско синтеровање - SLS

Код ове технологије се слојеви честице праха селективно синтерују скенирањем површине CO₂ ласером. Прашкasti материјали који се користе јесу: најлон, поликарбонати и композитни метали. На слици 6 је дат приказ једног SLS штампача, као и модел који је одрађен овом технологијом [11]:



Слика 6. SLS штампач, као и израђен део истом технологијом [11]

За разлику од SLA технологије, где се на материјал делује светлосном енергијом ласерског зрака, у SLS поступку ласер на честице делује својом топлотном енергијом. Прах се загрева до своје аморфне фазе, што резултује спајање честица међусобно и са претходним слојем. Како је количина енергије која је потребна да прах доведе до температуре аморфне фазе, много велика, комора се помоћу додатних грејача греје тик испод температуре синтеровања. Након тога топлотна енергија ласера доводи до синтеровања. Процес израде дела је приказан на слици 7:



Слика 7. Поступак израде SLS поступком [11]

Процес почиње наношењем слоја праха на радну површину где треба изградити део, одговарајућим механизмом са ваљком, који преузима прах из коморе са прахом. Ласерски зрак је модулиран тако да пада само на део површине праха тј. тамо где је попречни пресек дела који се израђује. Затим се када са прахом диже и наноси се следећи слој праха, док се комора где је део спушта за дебљину слоја. У овом случају није потребна носећа структура јер у току израде, део придржава прах. Процес се понавља до завршетка дела [8].

Теоријски, овде се могу користити пластике, композити, метали и керамике. Користе се за израду делова, што даје велике могућности за функционална испитивања. Неки од материјала који су доступни [8]:

- **Полиамид.** Пластика (Котерм или најлон) је веома тврда пластика која због својих хемијских особина спада у веома жилаве материјале са одличним термичким и хемијским карактеристикама. Најважније карактеристике које издвајају овај материјал од осталих пластичних материјала су његова невероватна жилавост, тврдоћа и отпорност на хемикалије па је тако добар избор за јаке ударе и услове експлоатације.
- **Поликарбонат.** Стандардна индустријска пластика. Погодан за израду концепцијских и функционалних модела. Од овог материјала се производе поликарбонатне плоче које су идеалне за примену на кровним површинама, надстрешницама, преградним зидовима итд.
- **Метал.** Laser Form је специјални прашкасти материјал који се састоји од зрнаца нерђајућег челика обложених полимером који има улогу везивног средства током процеса синтеровања. Делови израђени од овог материјала су порозни. Користи се за израду металних делова, посебно за делове алата за бризгање пластика са великом издржљивошћу циклуса бризгања.

Предности SLS технологије [8]:

- делови се израђују у прецизно контролисаном окружењу,
- велики избор материјала,
- нема потребе за ослонцима,
- није потребно пуно постпроцесирања.

Недостаци:

- велике димензије система,
- висока потрошња енергије,
- слаб квалитет површине готовог деча.

3.3 Тродимензионално штампање 3DP

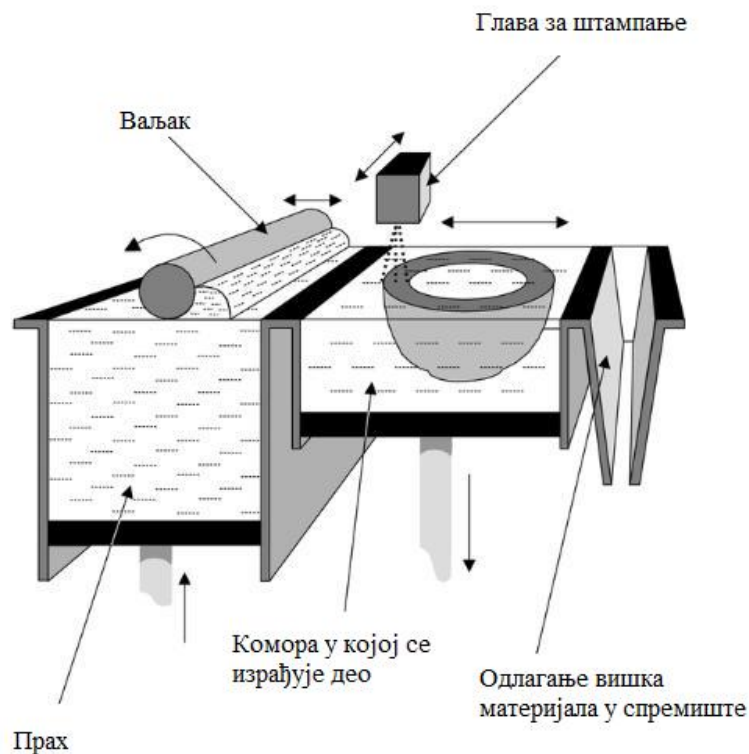
Технологија тродимензионалног штампања (3DP) развијена је на Институту за технологију, Масачусетс (MIT). Поступак је сличан SLS поступку, али уместо да се ласером синтерује материјал, користи се глава која је слична глави коју користе инкџет штампачи. Везивно средство се помоћу те главе наноси на прах и то само на деловима који одговарају попречном пресеку дела који се израђује. Овакав систем је ограничен одабиром везивног средства, али је довољно свестран да се делови који се израђују могу израдити и у боји. То се добија тако што се уместо једне главе, могу користити више глава истовремено са различитим карактеристикама везивног средства. На слици 8 дат је приказ израђеног дела овом технологијом (десно) као и 3DP штампач марке Еден 250 (лево).



Слика 8. 3DP штампач (лево) и део израђен 3DP технологијом (десно) [12]

На слици 9 је приказан шематски приказ штампања 3DP методом. Овај систем се састоји од спремишта праха која се подиже и клипа за додавање материјала, ваљка, средње коморе у којој се израђује део са платформом која се спушта и на крају отвор за прихватање вишка материјала [8].

У првој операцији, покретни мост који носи ваљак и главу за штампање креће се с лева на десно. Ваљак се окреће у смеру супротном приказаном на слици који односи одређену количину праха. Затим се тај прах развлачи у танак слој преко платформе радне коморе. На крају хода удесно, ваљак односи вишак праха до отвора који га прихвата и спроводи у спремиште. У последњем кораку, мост се креће с десна на лево, а при том млазница на глави за штампање бризга везивно средство у одговарајућим тачкама које одговарају попречном пресеку дела и тиме израђује текући слој модела. При доласку моста у крајњи положај, платформа са материјалом се подиже за један ниво навише, док се платформа где се штампа материјал спушта за дебљину слоја, и све је спремно за поновни циклус [8].



Слика 9. Шематски приказ поступка израде 3DP поступком [13]

Најчешћи материјали који се примењују у 3DP поступку јесу [8]:

- **Прах на бази скроба.** Продају се при ознакама zp14 и zp15e, уз употребу zb51 везивног средства. Користе се за прецизно ливење и ливење са топљивим моделима.
- **Прах на бази гипса.** Имају ознаке zp102 и zp250. Користе се за израду презентационих модела и прототипова.

Главне предности 3DP поступка:

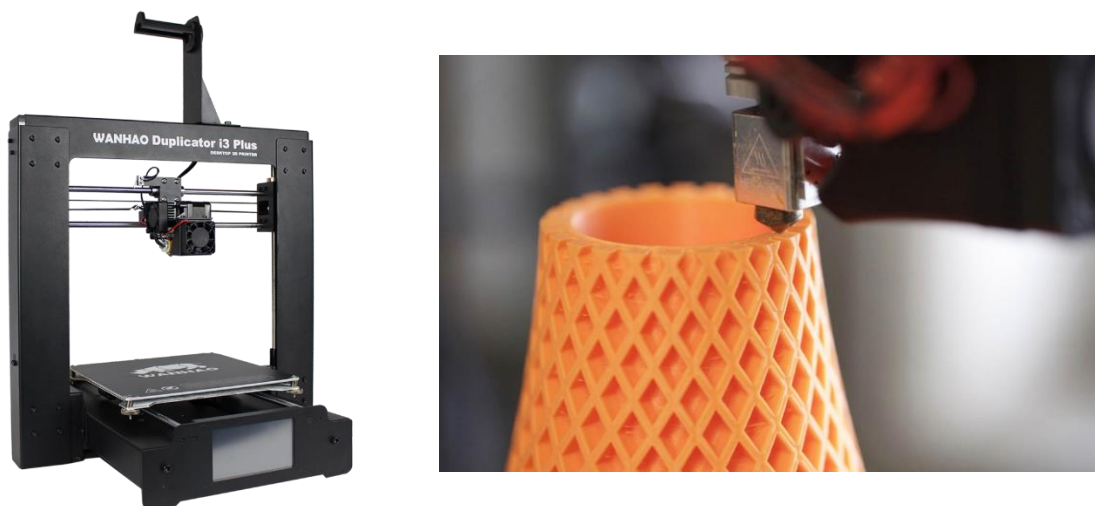
- велика брзина,
- свестраност,
- једноставност употребе,
- нема отпадног материјала.

Главни недостаци 3DP поступка:

- ограниченост функционалности делова,
- ограничен избор материјала,
- слаб квалитет површине.

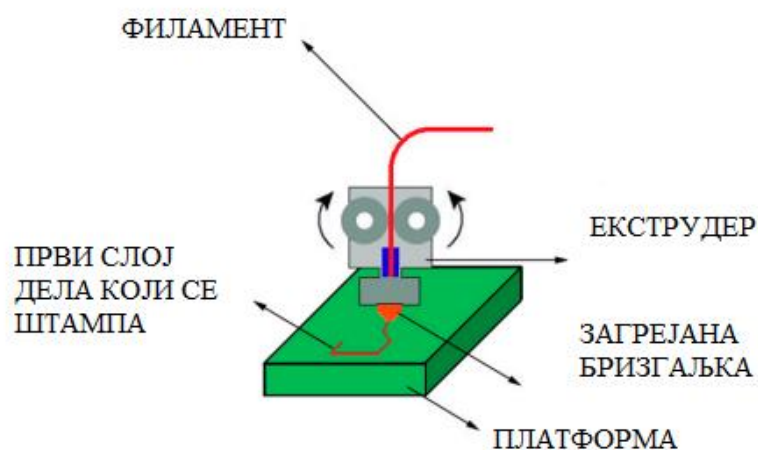
3.4 Моделирање депоновањем истопљеног материјала

Поступак моделирања депоновањем (екструдирањем) истопљеног материјала (енг. **Fused Deposition Modeling – FDM**) настала је 1992. године у САД. После стереолитографије, ово је најзаступљенија техника. Принцип рада се заснива на специјално дизајнираној глави (екструдер) која топи материјал и екструдира на радну површину. Материјал је углавном у облику танке жице (нити). На слици 10 је дан приказ FDM штампач (лево) и део који је израђен овом технологијом (десно).



Слика 10. FDM штампач (лево) [14] и део израђен FDM поступком (десно) [15]

Материјал се уводи у екструдер са намотаја где се загрева до температуре топљења а онда се убризгава кроз бризгаљку. На слици Слика 11 је дат шематски приказ FDM поступка.



Слика 11. Шематски приказ FDM поступка [15]

Екструдер се креће унутар контуре попречног пресека дела који се израђује при чему се материјал наноси на радну површину (платформу). Као и код свих адитивних поступка брзе израде модел се израђује из низа слојева. Након завршеног слоја, долази

до подешавања растојања између платформе и екструдера за дебљину слоја. Температура брызгалке и њена брзина треба бити одржавана на константној температури и брзини како би површина била континуалнија [8].

Неки од материјала који се користе јесу [8]:

- **Acrylonitrile butadiene styrene.** ABS је прозиран термопластични и аморфни полимер. Овај материјал се може загревати до топљења, затим охладити па поново топити без значајне деградације самог материјала. Структурно је врло чврст, због чега се користи у стварима као што су заштитна кућишта и амбалажа.
- **Polyactic Acid.** PLA здрава органска пластика. Не мрви се, дозвољава бојење и завршну обраду. Овај материјал издржава до 60° без деформације. Сјајна пластика за функционалне и концептуалне прототипове, маркетиншке материјале и завршне обраде. Својства ове пластике пропадају уколико су изложене сунцу [8].

Предности FDM технологије:

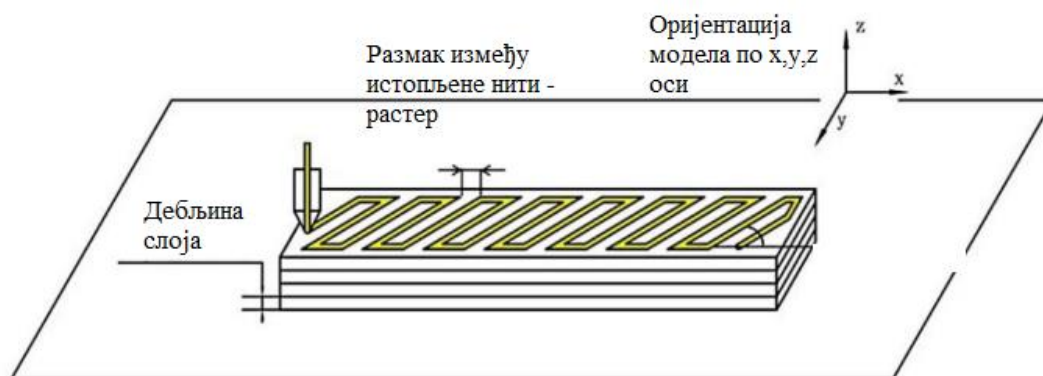
- израда функционалних делова,
- минимум отпада,
- лакоћа уклањања ослонаца,
- материјали нису токсични.

Недостаци FDM технологије:

- ограничена тачност,
- спора израда дела,
- непредвидиво скупљање.

3.4.1 Радни параметри FDM штампе

Процес FDM технологије обилује могућностима за подешавање параметара производње који имају утицај на коначни резултат штампе. На слици 12 су дати неки од радних параметра FDM штампе.



Слика 12. Радни параметри FDM штампе

Неки од параметара јесу:

- **Дебљина слоја.** Представља параметар је одговоран за такозвану "резолуцију" бочних зидова штапаног дела. С обзиром да је на бочним површинама овај фактор најочљивији, вредност његове дебљине дефинише и изглед те површине. Што је мања дебљина то је површина финија.
- **Размак између слојева.** С обзиром на анизотропну структуру узорака израђених овом технологијом, сваки слој је сачињен из много депонованих нити. Ова вредност подразумева растојање између два нити, што дефинише и проценат унутрашње попуне, односно саму порозност дела.
- **Ширина слоја.** Односи се на ширину депонованог филамента.
- **Међусобни угао депонованих слојева.** Преставља угао под којим су нити слоја оријентисане у односу на х осу платформе за штампу. Често истраживане вредности угла су 0° , 45° и 90° .
- **Врста унутрашње попуне објекта.** Односи се на саму геометрију унутрашњих слојева дела који се израђује. Неки од најчешћих су: линијска, хексагонална (облика саћа), дијамантска (ромбоидна), а постоје и неке чија је улога више естетска.
- **Проценат унутрашње попуне штапаног дела.** Дефинисан размаком између нити. Варирањем ове вредности може да се добије узорак веће или мање масе са већим или мањим шупљинама у унутрашњости дела. На слици 13, приказане су различите вредности унутрашње попуне.



Слика 13. Приказ различитих процената унутрашње попуне од 10% до 100%

4. FDM штампа композитних материјала

4.1 Комерцијално доступни композитни материјали за 3D штампу

Данас постоји низ комерцијално доступних композитних материјала за FDM штампу, што подразумева филаменте од термопластичне матрице који поседују укључке у виду честица, праха или љуспица другог, ојачавајућег материјала. Неке су мешавине дрвета, друге укључују пешчаре или кречњаке, а друге и даље садрже разне врсте метала, укључујући гвожђе, алуминијум, месинг, бронзу и бакар. Ова влакна попримају нека својства материјала са којим се мешају. Још један популаран састав су угљенична влакна; предмети одштампани са њега узимају део снаге влакана. Лоша страна ових сложених нити је што коштају знатно више од некомпозита.

Међутим, показало се да употреба додатака честица материјала добро утиче на чврстоћу и издржљивост предмета. Додатак честица се често користи и примењује на све више и више изотропних и конвенционално израђених полимерних композитних делова. У 3D штамп својства протока, величине дискретизације, дебљине слоја могу изазвати проблеме када се користе термопластични композити на бази честица. Код FDM 3D штампања, то укључује варијацију дебљине филамента, зачепљивање дизне, деламинацију слојева итд [16].

4.1.1 Филаменти ојачани угљеничним влакнима

Врло популарни, а сада комерцијално доступни, филаменти за 3D штампу су филаменти ојачани угљеничним влакнима.

Својства филамента од угљеничних влакана укључују невероватан однос чврстоће и тежине, крутост, добру затезну чврстоћу и отпорност на корозију и замор. PLA/CF композити показују мањи напор у односу на чисти PLA. Угљенична влакна (дужина 150 μm и 100 μm) у комбинацији с ABS – ом побољшавају механичка својства FDM одштампаног модела [17].

ColorFabb XT CF20 (PETG филамент од угљеничних влакана)

ColorFabb 'XT' (Слика 14) је у основи популарни PETG материјал. PETG материјал је трајни кополиестер где PET представља полиетилен терефталат, а G значи да је модификован гликолом за додатну издржљивост тј. са 20% ојачањем влакана.



Слика 14. *ColorFabb XT CF20* [17]

Слично као и PLA, PETG филамент има велику густину. Тежина може бити проблем код овог материјала јер су други материјали попут најлона лакши и до 20% за исту запремину.

MatterHackers NylonX (Најлонски филамент ојачан угљеничним влакнима)

NylonX филамент (Слика 15) је ојачан микро-угљеничним влакнима чиме се добија на жилавости и могуће је штампати делове који су крући, отпорнији на ударце и са већом затезном чврстоћом од класичног најлона [18].



Слика 15. MatterHackers NylonX [18]

Угљенична влакна додају стабилност и крутост, па је много мање вероватно да се делови искриве него код стандардног најлона. Такође и штампање је далеко лакше, а постижу се бољи резултати.

4.1.2 Филаменти ојачани дрвеним влакнима

Филаменти ојачани дрвеним укључцима (Слика 16) су постали прилично популарни због тога што се са њима лако рукује и добијају се добри резултати касније. Постоји неколико врста дрвених филамената, као што су бамбус, плута или дрвена прашина. Физичка својства ових различитих дрвених филамената се не разликују много, али су коначни резултати другачији [19].



Слика 16. Филамент ојачан дрвеним влакнима [19]

4.1.3 Композитни филаменти ојачани металним честицама

Мешавином PLA филамента и металног праха се добија још један популарни композитни филамент, који ствара визуално упечатљиве прилагођене комаде. Штампани делови израђени од металних филамената могу симулирати сјај правих метала уз мало брушења и полирања. Када је реч о специфичној тежини, овог материјала, у односу на PLA је тежи 3 – 4 пута, што додатно доприноси осећају да је део израђен од правог метала. Захваљујући честицама металног праха скупљање делова приликом штампе је сведено на минимум [20].



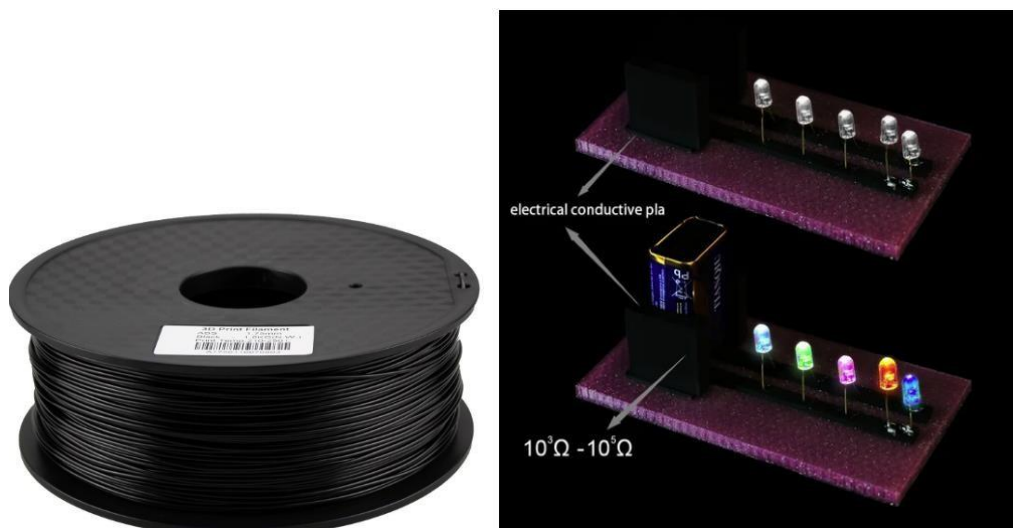
Слика 17. Филамент с бакарним пуњењем на PLA бази [20]

Уобичајени метали који се користе за смешу су бакар, месинг, нерђајући челик и алуминијум. Метални филаменти обично имају већи проценат састава чврсте компоненте – око 80%.

Металне филаменте није потребно штампати на високим температурама. Присутност метала у филаменту значи да се филамент загрева чак и брже од стандардног PLA и да дуже задржава топлоту. Могуће је штампати их и на нижим температурама и неће доћи до проблема са искривљењем [20].

4.1.4 Електропроводљиви филаменти

ABS Electro Conductive filament (Слика 18) је специјални ABS филамент који има својства проводника. Састав материјала је ABS помешан с 5 – 8% угљеничних влакана са специфичном отпорношћу $106 \Omega m$ [21].



Слика 18. *ABS 1,75mm Electro Conductive филамент и штампa [21]*

Погодан је за израду кућишта за електронику због својства антистатичке заштите. Има изузетне механичке карактеристике, велику отпорност на удар као и високу границу за пластичну деформацију у односу на остале ABS материјале.

Овај филамент може се користити за елиминацију статичког наелектрисања. Има велику примену у кутијама за складиштење, LCD отремницима, кутијама за филм, кућишта за чипове, сензоре, fine електронске компоненте, полупроводнике итд.

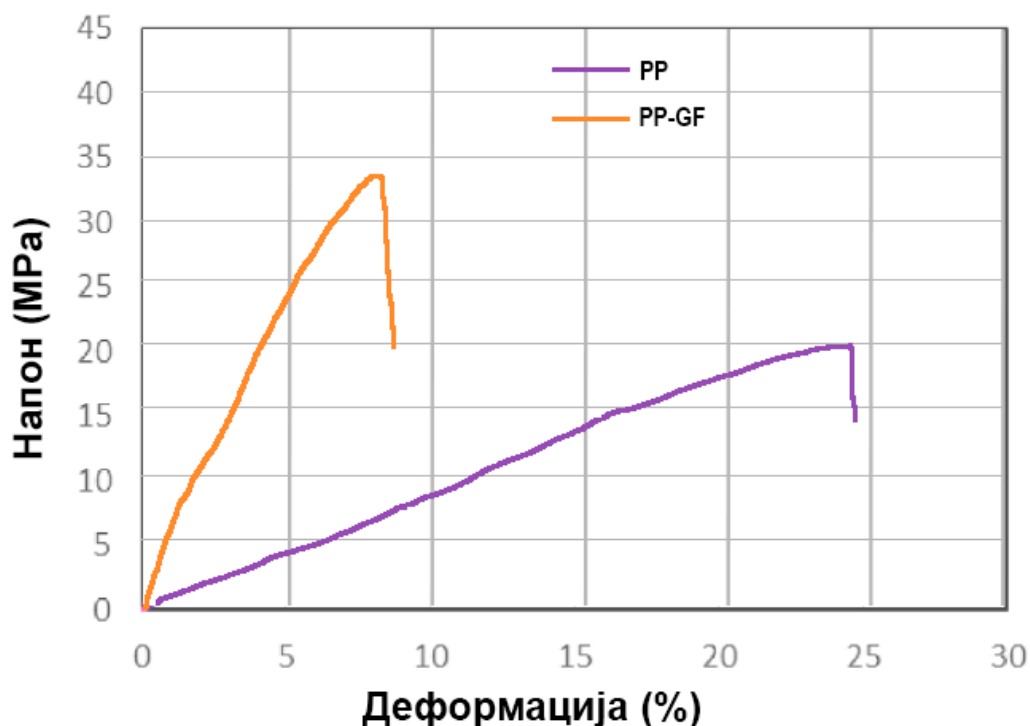
4.2 Нека решења израде композитних филамената за 3D штампу

Увидом у публиковане студије које се баве овом тематиком, можемо извести закључак да је ово веома популарна и слабо истражена тема, те да има простора за даља унапређења и напредак на овом пољу.

Содефиан и сарадници [22] су производили сопствени филамент, где је за матрицу коришћен полипропилен (PP), док су за ојачање коришћена стаклена влакна (енг. Glass Fibers – GF). Вршили су испитивања на затезање, при чему су узорци урађени FDM штампом.

Процес производње композитног филамента подразумевао је мешање PP и GF где је масени удео ојачивача 30% у екструдеру, и фабриковање филамента за каснију FDM штампу. Примећено је да, за разлику од чистих PP филамената, композитни показују незнатно већу кртост. Конкретно, неојачани PP је показао осам пута мањи модуо у односу на композит, док је издржао око четири пута већу деформацију пре пуцања.

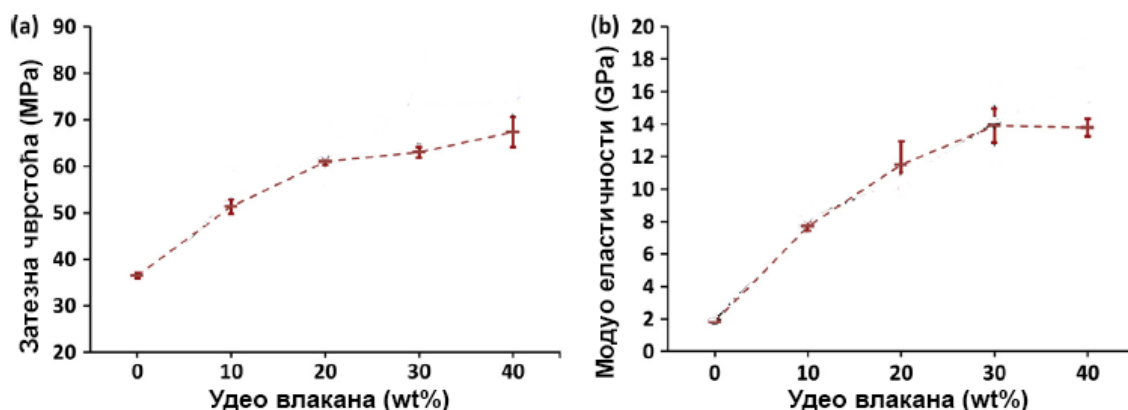
Након испитивања на затезање, добијени резултати су показали веће вредности затезне чврстоће и модула еластичности, а мање издужење при лому и мању еластичност у односу на чист PP узорак. Дијаграм затезања за овај случај је дат на слици 19.



Слика 19. Дијаграм напон – деформација у поређењу PP и PP – GF узорака [22]

Текиналп и сарадници [23] су испитивали композитни материјал од ABS пластике ојачан угљеничким влакнима. Као и претходно поменутом случају, мешање два материјала је остварено у екструдеру, на 220°C при брзини ротора од 60 min⁻¹ са неколико различитих масених удела ојачивача: 10, 20, 30 и 40%. Узорци су штампани на комерцијалном FDM штампачу, према ASTM D638 стандарду (тип узорка бр V). Битна напомена у овом раду је та да су успешно одштампани узорци до 30% масеног удела угљеника, а да је код узорака са 40% угљеника долазило до зачепљења дизне након неколико одштампаних слојева – коришћена је дизна отвора пречника 0,5 mm.

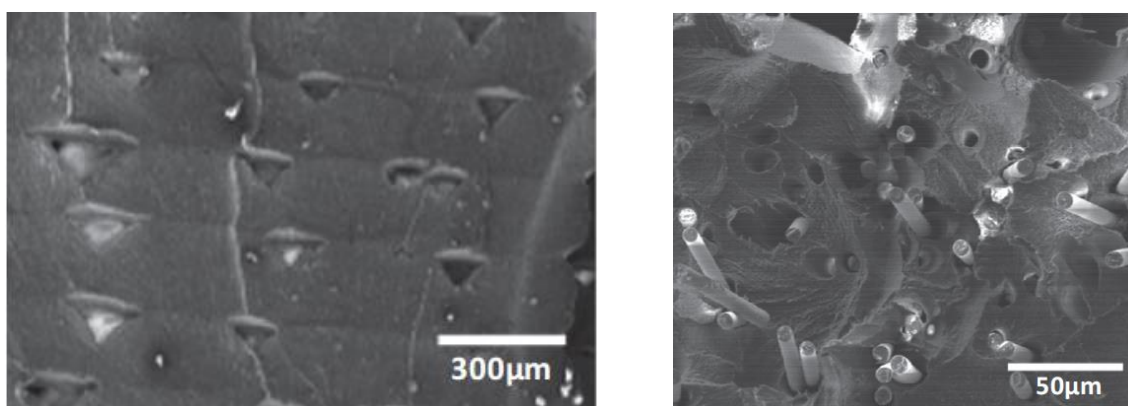
Узорци су тестирани на затезање, дијаграми зависности затезне чврстоће (лево) и модула еластичности (десно) су дати на слици 20. Испитивање је показало да затезна чврстоћа (слика 20а) расте са повећањем удела влакана, урађено је по пет примерака сваког од узорака и добијена је незнатна стандардна девијација у погледу затезне чврстоће што говори да FDM штампа представља добар начин униформне израде поновљених узорака, али са повећањем масеног удела угљеника повећава се и стандардна девијација, највероватније услед насумичније оријентације влакана од узорка до узорка. Такође је примећено да степен побољшања затезне чврстоће опада са повећањем масеног удела влакана.



Слика 20. Механичке карактеристике узорка у зависности од удела влакана: а) затезна чврстоћа; б) Јангов модуло еластичности [23]

На слици 20b је показана зависност Јанговог модула од масеног удела влакана у узорку. Могуће је приметити линеарно повећање модула са повећањем удела влакана, с тим што треба подсетити да узорци са 40% wt CF нису комплетно израђени већ само у неколико слојева, услед проблема са запушавањем дизне при овој концентрацији.

Увидом у попречне пресеке након затезања на електронском микроскопу (енг. Scanning Electron Microscope – SEM) утврђена је зависност формирања пора од удела ојачивача у композиту. На слици 21 је приказан попречни пресек након лома код (лево) чистог ABS узорка и код композита (десно) [23].



Слика 21. Површина лома (лево) чист ABS и композит са 10% CF (десно) [23]

Код узорка од чисте ABS пластике (слика 21, лево) је могуће приметити релативно велике троугаоне шупљине, слично орјентисане. Ове шупљине су отвори између линија штампе. Иако дизна екструдује истопљени материјал кружног пречника, он бива притиснут на дебљину слоја (у овом случају 0,2 mm) и формира елиптични облик, а како је материјал мекан још увек, доњи део се заравни, док се горњи охлади, пре следећег слоја, тако формирајући облику ивицу. Треба напоменути и да су ови отвори заправо каналићи коаксијални са смером деловања оптерећења и да не би требало да значајно утичу на механичка својства узорка.

Са додавањем угљеничних влакана (слика 21, десно), почиње формирање унутрашњих шупљина које нису само претходно поменуте, троугаоне и које могу да формирају тачке концентрације напона и да изазову отказ материјала на нижим

напонима. Такође је примећено да са повећањем удела угљеника, опада просечна величина троугаоних канала, што се може објаснити повећавањем топлотне проводљивости са додавањем угљеника јер се већ охлађени делови лакше греју са следећим слојем и тиме поново омекшавају што доводи до смањења шупљина. Међутим, повећање удела угљеника у композитима доводи и до повећаног формирања унутрашњих шупљина, што директно изазива мању интеракцију матрица – влакно, а одатле и лошије механичке карактеристике материјала. Мањак интеракције између влакана и матрице је један од узорака и извлачења влакана из самог композита, што је јасан показатељ нарушеног интегритета композита [23].

Шофнер и сарадници [24] су користили два типа влакана (Single Wall Carbon Nanotubes – SWNTs и Vapor Grown Carbon Fibers - VGCFs) за ојачање матрице од ABS пластике, композит је формиран за штампу на FDM штампачу. Примећено је да влакна бивају униформније орјентисана у смеру условљеном кретањем дизне штампача. Материјали ојачани VGCF и SWNT влакнима показали су побољшани Јангов модуо у поређењу са чистим ABS материјалом. Материјал ојачан SWNT влакнима показао је најбоље карактеристике у погледу затезне чврстоће и јанговог модула.. Материјали ојачани VGCF и SWNTs показали су побољшање модула од 44 и 93%.

Фереира и сарадници [25] су испитивали PLA материјал ојачан кратким влакнима угљеника (CF) али су посматрали и правце штампе (0° , 45° , 90°). Резултати које су добили су показали знатно повећање Јанговог модула (око 2,2 пута) код узорака код којих се правац штампе поклапао са осом деловања оптерећења у поређењу са узорком од чистог PLA. Док је Јангов модуо код узорка где је правац штампе био управан на правац деловања силе, и смицајни модуо, код узорка где су правци штампе били под $\pm 45^\circ$ повећани 1,25 и 1,16 пута, редом.

У случају испитивања затезне чврстоће за сва три узорка, није примећено побољшање механичких својстава код композитних узорака у поређењу са чистим PLA узорцима – у оба случаја PLA матрица је била већински носилац оптерећења.

5. Израда сопственог композитног материјала и механичка испитивања

Након прегледане литературе одлучено је да се изврши сопствени покушај израде композитног филамента за FDM штампу, а потом тим филаментом израдити узорке за механичка испитивања. Филамент ће бити израђен мешањем ABS пластике и рибарске струне од флуорокарбона.

Сва експериментална испитивања, 3D штампа и израда филамента су извршена у Центру за информационе технологије (ЦИТ) Факултета инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу.

5.1 Израда филамента за 3D штампу

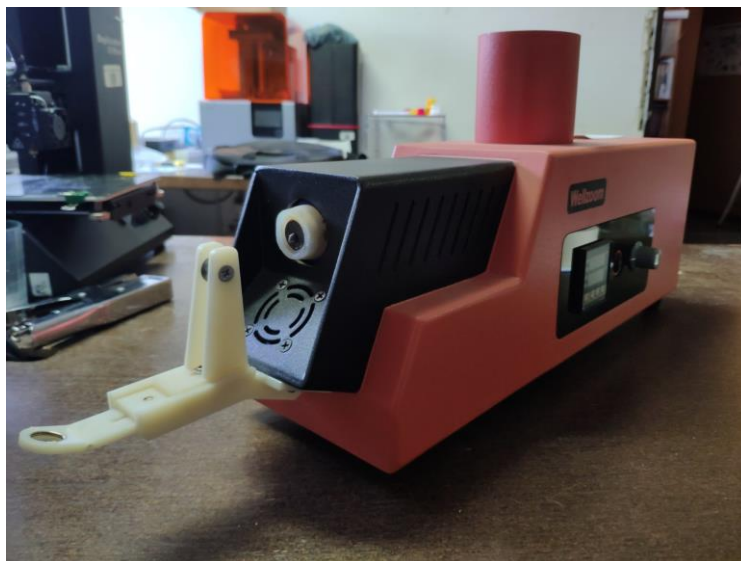
Пре саме израде, било је потребно исецкати на ситне комаде поменуте материјале у односу 1:10 да би се обезбедио масени удео укључака од 10%, како је приказано на слици 22.



Слика 22. ABS филамент, исецкан (лево) и ситно исецкана струна за пецање – флуорокарбон (десно)

Након тога је уследило мешање ова два материјала. ABS материјал је морао бити исецкан на одређену величину како не би дошло до таложења ојачања на дно екструдера.

Уређај који је коришћен за мешање ова два материјала јесте екструдер марке **Wellzoom C desktop filament extruder** који је приказан на слици 23 [26]:



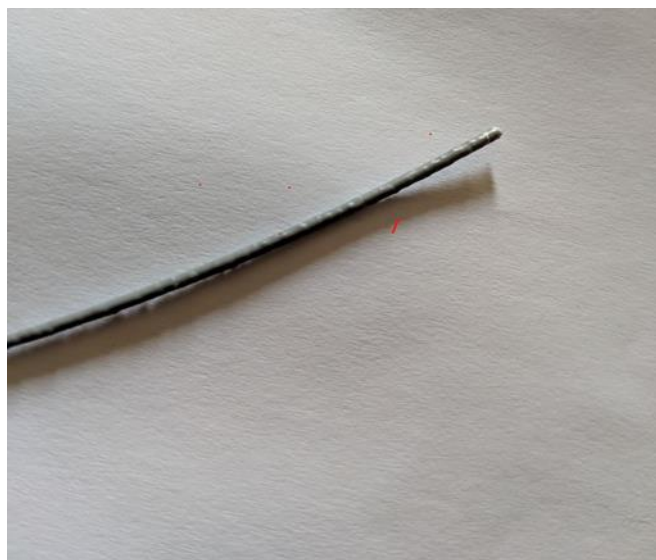
Слика 23. Екструдер марке **Wellzoom** [26]

У следећој табели су дате карактеристике екструдера:

Табела 3. Карактеристике екструдера [26]

Карактеристике екструдера	Вредност
Брзина екструдирања	1800 – 2500 mm/min
Дијаметар излазне млазнице	1,75 mm
Радна температура	Преко 320 °C
Величина	560x160x200mm

Неки од проблема који су се јавили приликом израде јесу ти да је морала да се подеси одговарајућа брзина екструдирања како филамент не би губио на дебљини. Такође је на почетку филамент био само од матрице с обзиром да је мешање ова два материјала било ручно. Приликом штампе, екструдер је био постављен на висини око два метра како би се филамент, приликом израде, охладио а истовремено и очврснуо како не би дошло до ломљења. Након тога се филамент паковао у котуре и био спреман за даљу обраду. На слици 24 је приказ добијеног композита тј. филамента:



Слика 24. Израђени композитни филамент

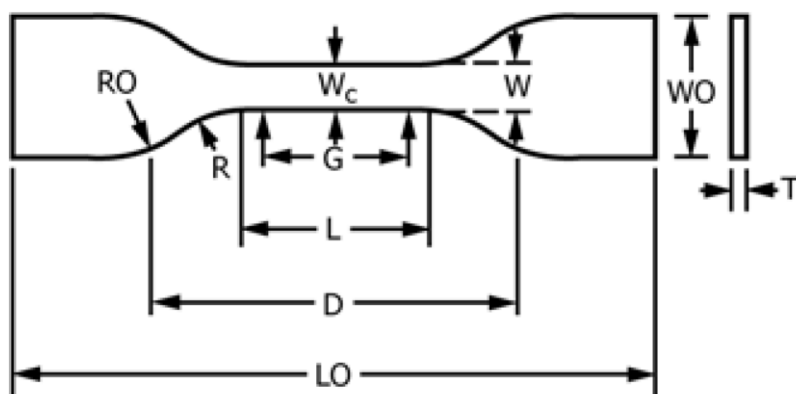
5.2 Израда узорака

Након извршене израде филамента следећи корак би био 3D штампа узорака коришћењем новодобијеног филамента. Штампа је вршена на комерцијално доступном, десктоп 3D штампачу Wanhao Duplicator i3 Plus (Слика 25) [14].



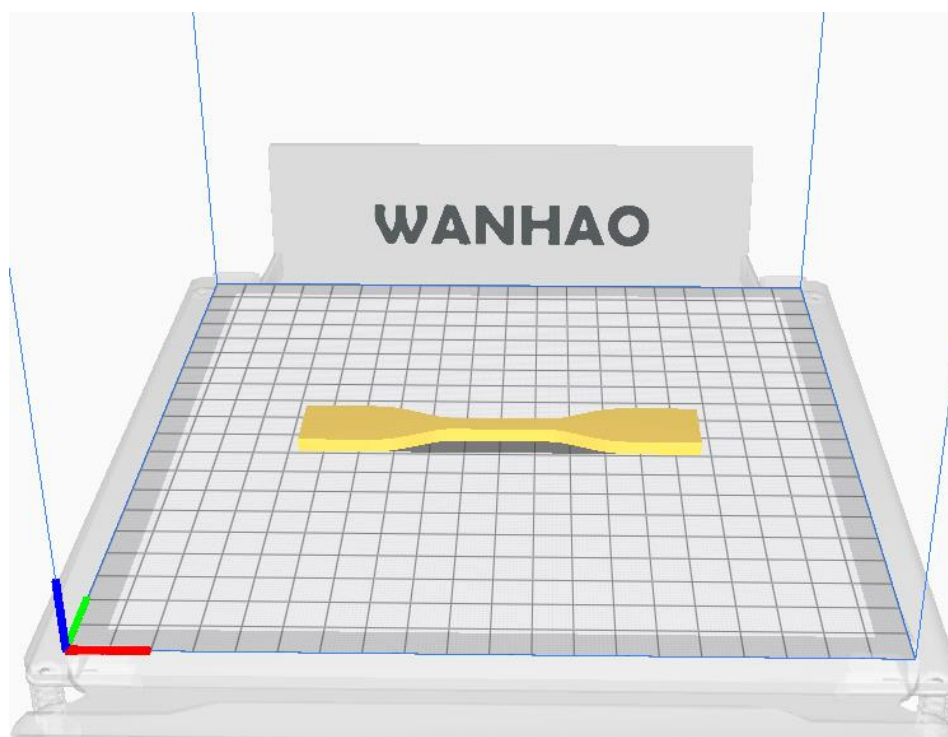
Слика 25. 3Д штампач Wanhao Duplicator i3 plus [27]

Најпре је направљен модел епрувете према стандарду за методе тестирања затезних својстава пластика ASTM D638 [28], узет је тип IV епрувете димензија према слици Слика 26.



Слика 26. Димензије епрувете за штампу: $T=4\text{ mm}$; $LO=115\text{ mm}$; $WO=19\text{ mm}$; $W=6\text{ mm}$; $L=33\text{ mm}$; $G=25\text{ mm}$; $D=65\text{ mm}$; $R=14\text{ mm}$ [28]

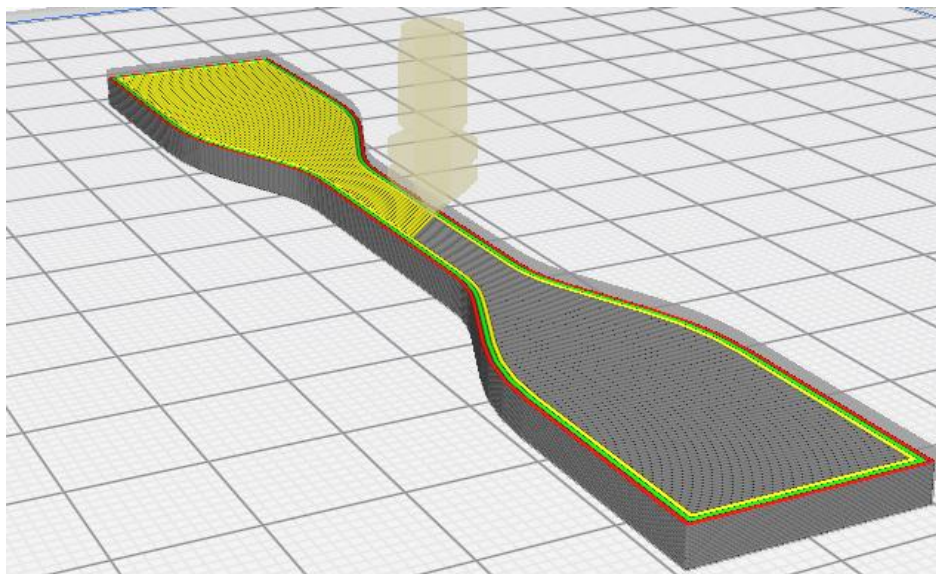
Како би се извршила припрема CAD (енг. *Computer Aided Design*) модела за 3D штампу потребно је генерисати STL (енг. *Stereolithography*) формат датотеке, који се касније увози у неки од софтвера за припрему 3D штампе (слајсера). За припрему овог модела коришћен је софтверски пакет Ultimaker Cura 4.6.2. На слици 27 је приказан STL модел епрувете увезен у програмски пакет Ultimaker Cura.



Слика 27. Модел епрувете на подлози штампача у Ultimaker Cura софтверском пакету

Кроз овај софтвер је могуће у потпуности подесити све параметре штампе, како оне основне (брзину кретања главе, температуру дизне, температуру подлоге, брзину изласка материјала итд.), тако и напредније опције као што је на пример угао наношења материјала. За параметре штампе су узети стандардни параметри за ABS (bed temp. 60°C , extruder temp. 240°C , infill 100%). Из овог софтвера се генерише G-код по коме ће управљачки програм штампача моћи да реализује штампу. Такође овај програмски пакет може да нам пружи и симулацију штампе тако да можемо бити сигурни да су сва

подешавања баш оно што смо желели. На слици 28 је приказана израда једног од слојева епрувете и положај главе штампача.



Слика 28. Симулација процеса штампе

Како би се упоредили механичке карактеристике материјала одлучено је да се одштампају по две епрувете од чисте ABS пластике, као контролне, и две епрувете од композитног филамента. На слици 29 је приказан процес штампе једне епрувете.



Слика 29. Процес штампе епрувете

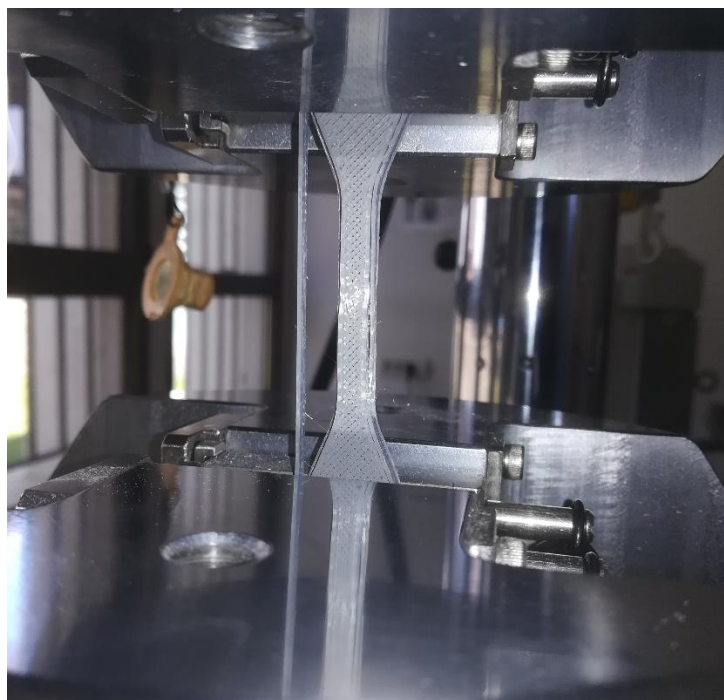
А сва четири узорка су приказана на слици 30 где су бројем 1 означени контролни узорци од чисте ABS пластике, док су бројем 2 обележени композитни узорци. Штампа се није могла одрадiti на стандардној дизи од 0.4 mm јер је долазило до њеног зачепљења, па је на штампачу постављена дизна од 0.8 mm пречника. Разлог томе јесу велике дужине влакна јер се сечење самих нити радило ручно.



Слика 30. Одштампани узорци за испитивање: контролни узорци од чистог ABS-а (1A и 1B) и композитни узорци (2A и 2B)

5.3 Механичка испитивања

Узорци су испитани на једноосном систему за испитивање - кидалици Shimadzu ENF-EV101K3-070-0A, Јапан, која поседује давач силе од 100 kN. Задато је константно померање од 1 mm/min. Ова брзина је одабрана како би се изазвао отказ материјала између 30 s и 5 min испитивања, како је у складу са ASTM D638. Праћено је оптерећење и померање, испитано је укупно четири узорка. Један од узорака током испитивања је приказан на слици 31.



Слика 31. *Узорак током иситивања*

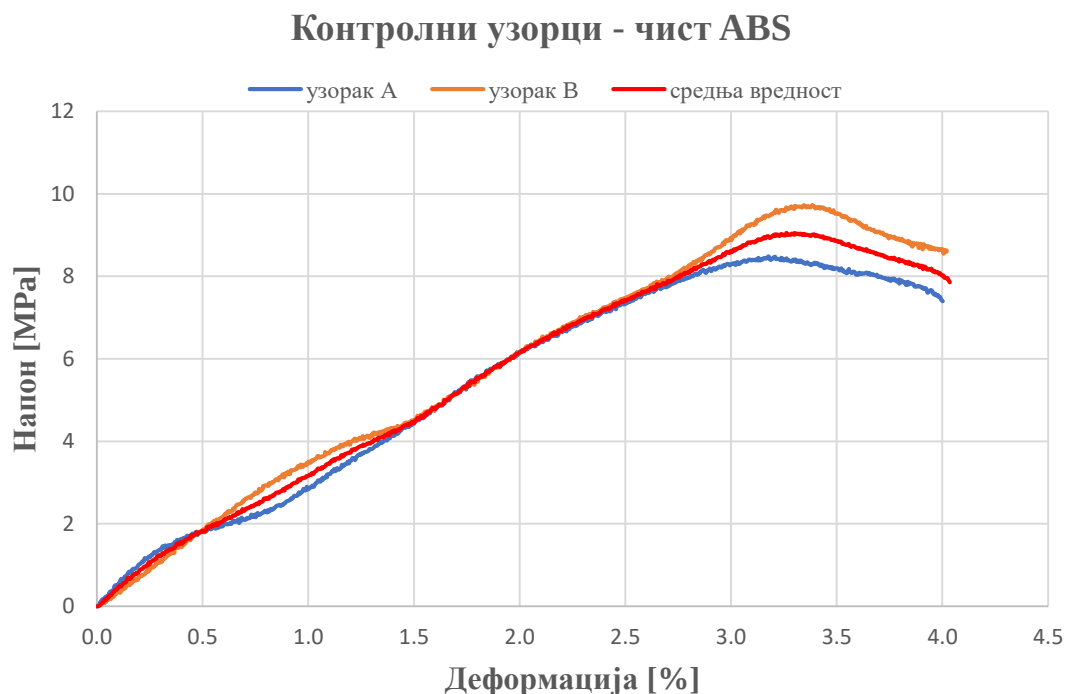
Узорци након испитивања су приказани на слици 32. У оба случаја је дошло до потпуног лома мерне зоне узорака. Код узорака од чисте ABS пластике је дошло до униформнијег лома док је код композитних узорака дошло до одвајања контуре узорка (shell) од унутрашњег дела материјала.



Слика 32. *Узорци након испитивања*

5.4 Резултати

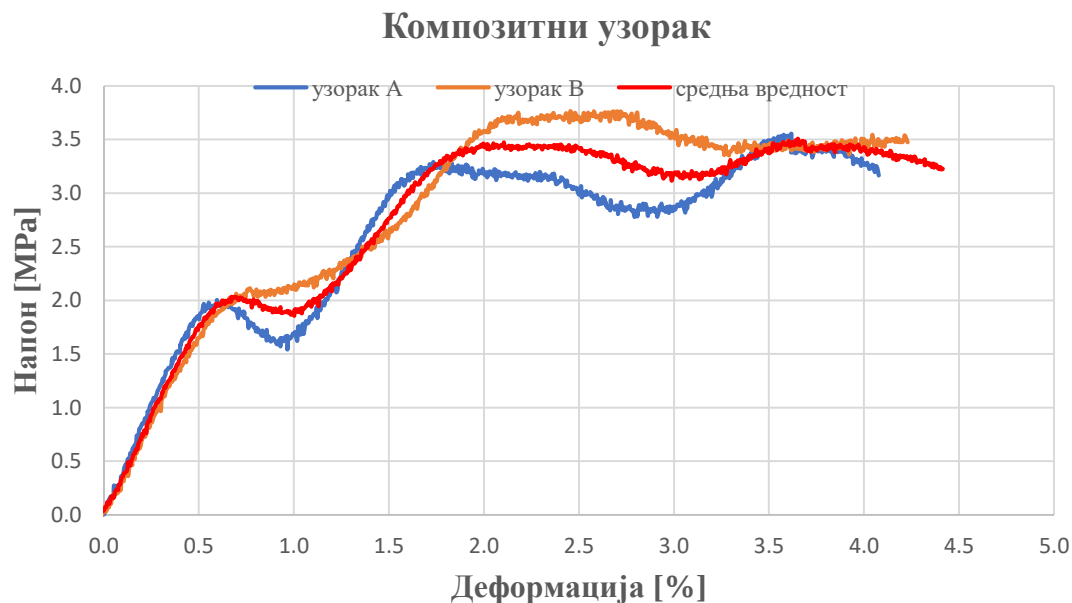
На слици 33 је приказан дијаграм напон – деформација за контролне узорке од чисте ABS пластике. По једна крива за сваки од узорака, као и крива (црвена) која представља средњу вредност између два узорка.



Слика 33. Дијаграм напон – деформација узорака од чистог ABSa

Са дијаграма се може приметити да су оба узорка показала готово исту еластичност, уз разлику да је узорак В показао већу затезну чврстоћу.

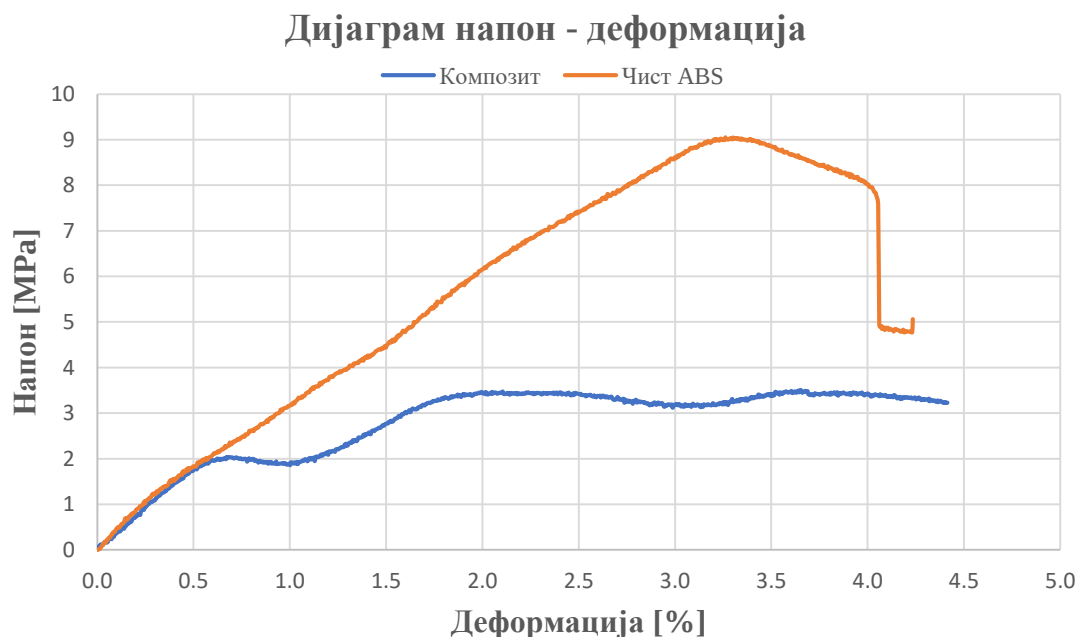
На слици 34 је дат дијаграм напон – деформација композитних узорака, такође по једна крива за сваки од узорака, као и крива средње вредности.



Слика 34. Дијаграм напон – деформација композитних узорака

Код ових узорака је понашање такође сродно – сличне еластичности и сличних затезних чврстоћа уз нешто већу затезну чврстоћу узорка В.

Коначно, на слици су дати упоредни дијаграми напон – деформација композитног и контролног узорка.



Слика 35. Дијаграм напон – деформација средњих вредности композита и чистог ABS

Уочене су драстичне разлике у погледу затезне чврстоће, док се линеарни део криве који одговара композитном материјалу, поклапа са линеарним делом контролног узорка, одакле се може закључити да није дошло до промене у модулу еластичности

композитног материјала. Даље следи да матрица од ABSa у композитном материјалу носи сво оптерећење, али је код композита уочена знатно нижа затезна чврстоћа.

Слични резултати у погледу еластичности су пријављени и у литератури [25].

За овакво понашање материјала су највероватније одговорне шупљине настале око укључака, чиме је значајно повећана порозност материјала, а самим тим ослабљена механичка својства. Такође грануле матрице и влакана су мешане у екструдеру само једном што је могло да доведе до лошег мешања ова два материјала, мању хомогеност од очекиване као и лоше адхезије између матрице и влакана што такође ремети механичка својства композита.

Препорука за побољшање процеса израде материјала, у даљим истраживањима, би била да се већ направљени филамент уситни и такав врати у екструдер на поновно мешање и израду новог филамента, док се могућност умањења шупљина насталих током штампе огледа у загревању готових узорак на температурама 50 – 70°C у периодима од 1 до 2 часа чиме би се постигло поновно омекшавање материјала и надомешћавање насталих шупљина, а уједно и отпуштање неких заосталих напона из процеса штампе [29].

Такође, постоји простора за још механичких испитивања попут испитивања на притисак и савијање, као и комбиновање других параметара штампе са оваквим композитним филаментом, попут оријентације, праваца штампе, брзине, температуре штампе и томе слично.

6. Мори – Танака хомогенизација микрокомпозита

Како композити показују различите фазе, различитих механичких и физичких својстава, микроструктурне карактеристике оваквих материјала могу бити моделиране са изотропним понашањем, али у реалности исказују анизотропност услед различитих својстава унутар једне структуре. Анизотропни материјални модели су доступни за линеарну еластичност док се у нелинеарности појављују ограничења на ортотропне материјалне моделе, који не могу да представе физику свих хетерогених материјала. Циљ микромеханике је да предвиди анизотропно понашање хетерогеног материјала на основу геометрије и својстава индивидуалних фаза, а усмерено ка хомогенизацији. Једна од аналитичких метода микромеханике континуума је Мори – Танака метод [28].

За хомогенизацију композита и одређивање ефективних механичких карактеристика Мори – Танака методом потребно је поставити улазне параметре који карактеришу матрицу и укључке. То су Поасонов коефицијент, моду еластичности и запремински удео сваког од материјала. Добијене ефективне карактеристике се могу потврдити стандардним механичким испитивањима, попут затезања и сл. [28].

На основу Ешелби решења, укупни напон индукован појавом сопствених напона је униформан.

Може се дефинисати тензор S четвртог реда који представља однос ограниченог напона унутар укључака са својим сопственим напоном:

$$\varepsilon = S\varepsilon^* \quad (6.1)$$

Где је S Ешелбијев тензор четвртог реда, који зависи од материјалних карактеристика и облика укључка (цилиндар или сфера) и гласи [29]:

$$S = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2S_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2S_{2323} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Ефективни модул захтева дефинисање тензора концентрације напона A . Израз за тензор концентрације напона се може дефинисати као:

$$A_r = T_r \left(\sum_{r=0}^N C_r T_r \right)^{-1} \quad (6.3)$$

$$A_0 = \frac{1}{C_0} \left(I - \sum_{r=1}^N C_r T_r \right)^{-1} \quad (6.4)$$

тензор ефективне крутости се добија из израза тензора концентрације као:

$$L = \sum_{r=0}^N C_r L_r A_r \quad (6.5)$$

Узимајући изотропни тензор крутости могуће је добити ефективне вредности као:

$$\lambda_{ef} = L_{12} \quad (6.6)$$

$$\mu_{ef} = \frac{1}{2}(L_{11} - L_{12}) \quad (6.7)$$

$$E_{ef} = \frac{\mu_{ef}(3\lambda_{ef} + 2\mu_{ef})}{\lambda_{ef} + \mu_{ef}} \quad (6.8)$$

$$\nu_{ef} = \frac{\lambda_{ef}}{2(\lambda_{ef} + \mu_{ef})} \quad (6.9)$$

$$\kappa_{ef} = \frac{3\lambda_{ef} + 2\mu_{ef}}{3} \quad (6.10)$$

Циљ је био добити ефективне вредности хомогенизованог материјала на основу карактеристика матрице и укључка добијених експериментално и из литературе [28] применом упрошћене Мори – Танака методе. Улазне карактеристике материјала су дате у табели 3:

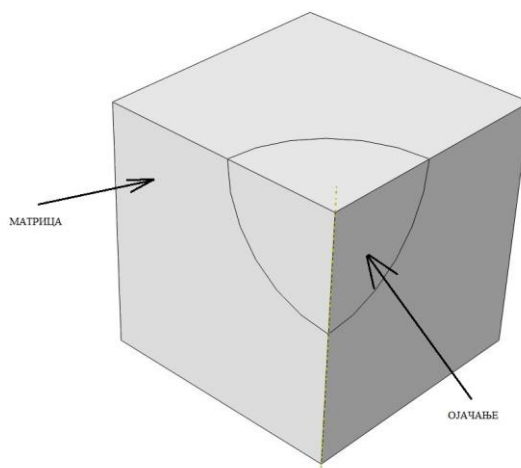
Табела 3. Улазне и излазне материјалне карактеристике

Материјалне константе	E (GPa)	ν
Матрица	2,8	0,35
Влакно	2,45	0,34
Ефективне вредности	2,750	0,35

7. Нумеричка анализа

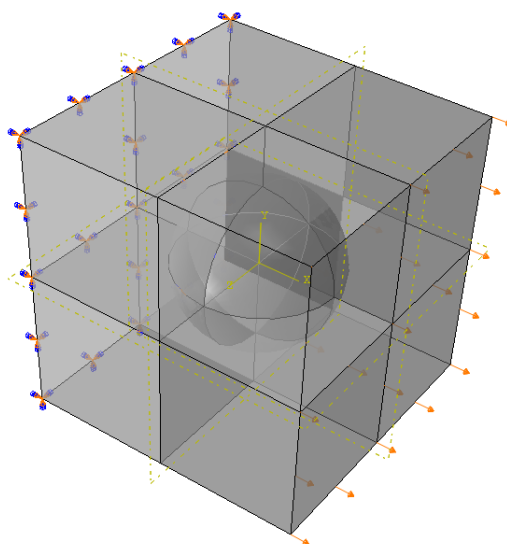
Како је однос запремина у израђеној епрувети 10%, одлучено је да се изради CAD модел који ће престављати исти однос запремина као стварни модел.

Моделирана је коцка чија је вредност запремине једнака односу запремина штампаног композита. Због квалитетнијег приказа резултата нумеричка анализа је одрађена на осмини и половини коцке (Слика 36).



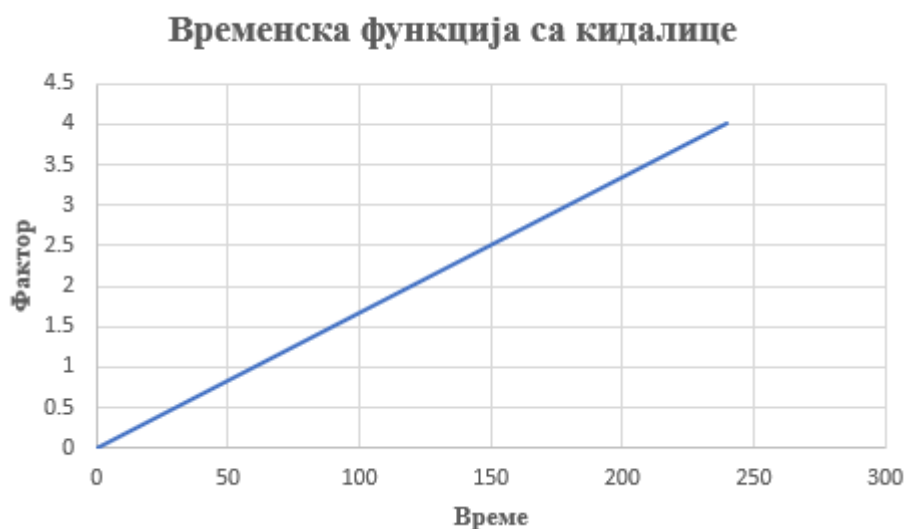
Слика 36. Матрица и ојачање композита

Модел је ограничен (Слика 37) тако да је коцка на једном крају фиксирана (означено плавом бојом), док је на другом крају задато померање (означено наранџастом бојом).



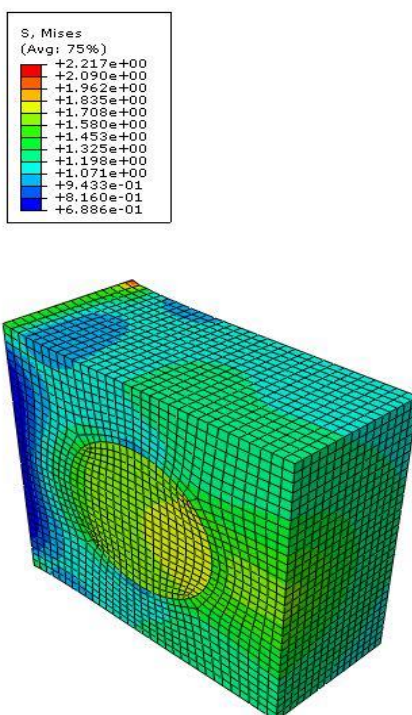
Слика 37. Задата ограничена и оптерећења на моделу

Вредност померања које је задато приликом анализе је преузето са кидалице (Слика 38). Након задавања ограничења задате су еластичне карактеристике материјала.

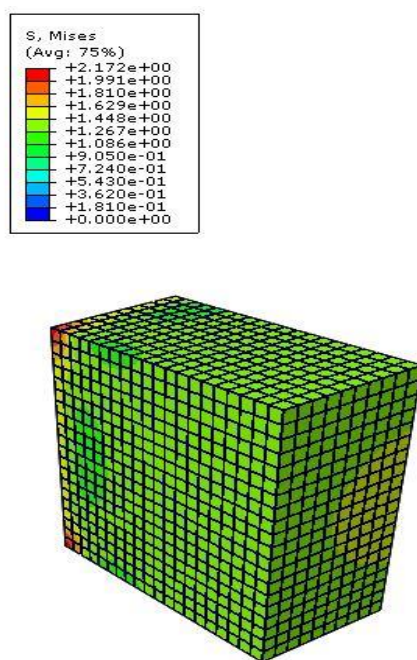


Слика 38. Временска функција увежсена са кидалице

Анализа је одрађена на два различита модела. Први модел је композитни материјал (Слика 39), док је други модел хомогени материјал добијем Мори – Танака методом (Слика 40). Приликом нумеричке анализе композитног материјала добијен је максимални напон (2.2 МПа) који се поклапа са експерименталним резултатима добијених са кидалице.

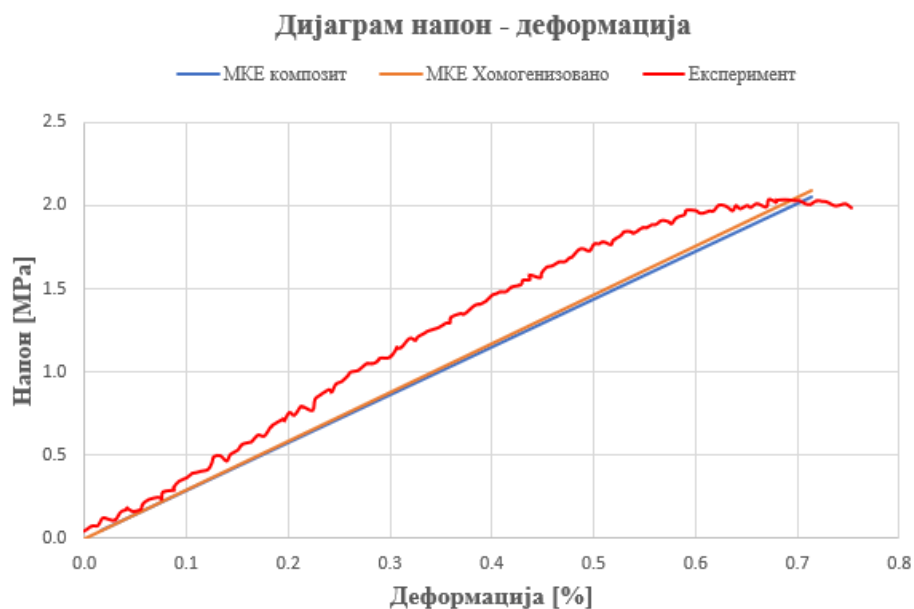


Слика 39. Композитни материјал урађен нумеричком анализом



Слика 40. Хомогенизовани модел добијен Мори – Танака методом

Следи дијаграм (где је приказано поређење експерименталних и нумеричких резултата добијених коришћењем карактеристика два материјала (композит), као и својстава материјала добијених хомогенизацијом, употребом Мори – Танака методе.



Слика 41. Упоредни дијаграм напон – деформација

На основу дијаграма се може видети да Мори – Танака метод даје врло добре резултате при хомогенизацији композитног материјала. Такође треба напоменути да је за нумерички модел претпостављено чисто еластично (линеарно) понашање материјала тако да се може рећи да долази до приближног поклапања резултата нумеричке анализе са експерименталним резултатима.

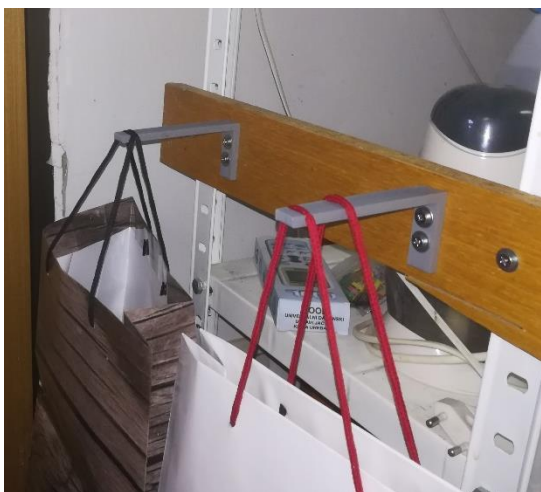
8. Практична примена

Пошто су извршена механичка испитивања на стандардним узорцима и након што су дефинисане механичке карактеристике материјала, прешло се на конструисање практично примењивог модела. Одабран је модел куке конзолног типа. Одштампана су два примерка, један од чистог ABS материјала, а други од добијеног композита. Овако одштампани модели су приказани на слици 42. Могуће је приметити повећану порозност композитне у односу на куку од ABS пластике.



Слика 42. Одштампане куке од композитног (лево) и чистог ABS материјала (десно)

Овако одштампане куке су подвргнуте тесту носивости – фиксиране су завртњима за вертикални носач а онда су излагане једнаким оптерећењима до лома материјала. За оптерећења су узете боце са водом од 0,5 l које су додаване једна по једна у кесе окачене о куке.



Слика 43. Поставка за испитивање кука, почетни положај (лево) и након првог оптерећења (десно)

Композитна кука је издржала оптерећење једне боце (слика 43, лево), док је до лома код ABS куке дошло након додавања треће боце (слика 44).



Слика 44. Лом куке од чистог ABSa

На основу спроведеног испитивања може се закључити да је композитна кука слабијих својстава, услед велике порозности унете од стране укључака.

9. Закључак

Многе савремене технологије захтевају материјале са комбинацијом својстава коју немају ни легуре, ни керамички материјали ни полимери. Неки од тих композита јесу композитни материјали ојачани влакнима. Мала маса, а велика чврстина јесте нека од особина која чини композитне материјале јако интересантне за истраживање.

Тродимензионално штампање као једна од савременијих брзих производних технологија је процес претварања тродимензионалног дигиталног модела у физички модел добијен из неког CAD софтверског програма.

Производи који се штампају могу бити од различитих материјала, од пластике, преко керамике, до метала. Технологија се и даље развија а нови материјали, помоћу којих се штампа се уводе невероватном брзином.

У овом раду објашњене су тренутне водеће технологије у адитивној производњи а посебно је стављен акценат на моделирање депоновањем истопљеног материјала. Ова технологија је представљена као комбинација са композитним материјалом који је направљен. Дат је приказ неких различитих решења штампања композитних материјала као и резултати добијени таквим штампањем.

Данас постоји низ комерцијално доступних композитних материјала за FDM штампу, што подразумева филаменте од термопластичне матрице који поседују укључке у виду честица, праха или љуспица другог, ојачавајућег материјала. Тако је настала идеја за израдом оваквих врста функционисања адитивне производње.

Одрађен је сопствени покушај израде композитног материјала мешањем два материјала помоћу екструдера. Следећи корак је био 3D штампа узорака коришћењем новодобијеног филамента. Штампа је вршена на комерцијално доступном, десктоп 3D штампачу Wanhao Duplicator i3 Plus. Како би се упоредиле механичке карактеристике материјала одштампане су по две епрувете од чисте ABS пластике, као контролне, и две епрувете од композитног филамента.

Узорци су испитивани на затезање и установљене су драстичне разлике у погледу затезне чврстоће, док се линеарни део криве који одговара композитном материјалу, поклапа са линеарним делом контролног узорка, одакле се може закључити да није дошло до промене у модулу еластичности.

Након експерименталног испитивања, добијени резултати су искоришћени како би се извршиле две нумеричке анализе. Прва са хомогенизованим материјалом Мори – Танака методом за хомогенизацију микрокомпозита, а друга са својствима оба материјала – матрице и ојачивача. Добијена су добра подударања експеримента и нумеричке анализе у еластичној зони самих материјала.

На самом крају је израђен практично примењив модел куке конзолног типа. Модел је био подвргнут тесту носивости, где је део који је израђен од композитног материјала показао доста мању носивост у односу на почетни чист материјал.

10. Литература

- [1] *Материјали и процеси: Увод*; Интернет страница: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-materials-and-processes>, (приступљено јун, 2020)
- [2] *Својства композитних материјала*; Интернет страница: <https://emupauto.ru/bs/svoistva-kompozitnyh-materialov-kompozicionnye-materialy-nizkaya-ekspluatacionnaya-tehnologichnost.html>, (приступљено април, 2021).
- [3] *Lady I. Композитни материјали*, Металургија 2014.
Интернет страница: <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, (приступљено јун, 2020)
- [4] Meri Burzić, Stojan Sedmak, Milorad Zrilić, Zijah Burzić, Dragan Jaković, Dejan Momčilović., “*Uticaj orijentacije vlakana na udarnu žilavost i osobine loma kompozita ugljenična vlakna – epoksi smola*” Институт за испитивање материјала, Београд, 2002
- [5] Антић М., *Kompozitni materijali*, “Kontrol-Inspekt” d.o.o, Београд, 2016
- [6] Lipošćak L., *Primena kompozita u zrakoplovnoj konstrukciji*, Карловац, 2016
- [7] ABS Материјали (Acrylonitrile butadiene styrene), Интернет страница: <http://www.plastikainfo.com/tehnologija/materijali-abs-akrilonitril-butadien-stiren-acrylonitrile-butadiene-styrene>, (приступљено август, 2020)
- [8] Трајановић М, Грујовић Н, Миловановић Ј., Миливојевић В. *Рачунарски подржане брзе производне технологије*. Машински Факултет у Крагујевцу, Центар За Информационе Технологије: 2008.
- [9] *The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing. 3Dnatives 2017*. Интернет страница: *The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing - 3Dnatives*, (приступљено јун, 2020).
- [10] *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing | Formlabs* <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> (приступљено април 2020).
- [11] *Selective Laser Sintering, SLS* /en/selective-laser-sintering-sls, Интернет страница: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls> (приступљено јун, 2020).
- [12] *LARGE 3D PRINTED PARTS - PAPAYA - Powered by Topkee Media* Интернет страница: <http://www.papaya3dp.com/?r=app/detail&id=27> (приступљено: јун, 2020).
- [13] *3D Printing technologies types and how it works*, Интернет страница: <http://www.risonprototype.com/printing-technologies-types-and-how-works-a-25.html> (приступљено: август 2020).
- [14] *Wanhao Duplicator i3 plus – Voxellab 3D Market*, Интернет страница: <https://3dmarket.rs/shop/3d-stampaci/wanhao/wanhao-duplicator-i3-plus/> (приступљено: август, 2020).

- [15] *FDM 3D Print | ISO 9001-2015 certified | Zeal 3D Printing. Zeal3Dprinting* Интернет страница: <https://www.zeal3dprinting.com.au/fdm-3d-printing/> (приступљено: август, 2020).
- [16] Valino AD, Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Messman J, Advincula RC., *Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites*. Progress in Polymer Science 2019;98:101162. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101162>, 2019
- [17] *XT-CF20*, Интернет страница: <https://colorfabb.com/xt-cf20>, (приступљено јануар 2021).
- [18] *NylonX Carbon Fiber Filament - 1.75mm (0.5kg)*. MatterHackers, Интернет страница : <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/nylonx-carbon-fiber-nylon-filament-1.75mm>, (приступљено : јануар, 2021).
- [19] *Wood Filament: The Basics & Best Wood PLA Brands. All3DP 2019*. Интернет страница: <https://all3dp.com/2/wood-filament-for-a-3d-printer-explained-compared/> (приступљено: јануар 2021).
- [20] *3D Insider - Leading 3D Printing Publication. 3D Insider* Интернет страница: <https://3dinsider.com/>, (приступљено: јануар, 2021).
- [21] *ABS 1,75mm Electro Conductive filament – Voxellab 3D Market* Интернет страница: <https://3dmarket.rs/shop/filamenti-za-3d-stampace/specijalni-filamenti/abs-175mm-electro-conductive-filament/>, (приступљено).
- [22] Sodeifian G, Ghaseminejad S, Yousefi AA., *Preparation of polypropylene/short glass fiber composite as Fused Deposition Modeling (FDM) filament*. Results in Physics 2019;12:205–22. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.065>, 2019
- [23] Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, et al. *Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing.*, Composites Science and Technology 2014;105:144–50., <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>, 2014
- [24] Shofner ML, Rodríguez-Macías FJ, Vaidyanathan R, Barrera EV. *Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication.*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2003;34:1207–17. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.07.002>, 2003
- [25] Ferreira RTL, Amatte IC, Dutra TA, Bürger D. *Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers*. Composites Part B: Engineering 2017; 124:88–100., <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>, 2017
- [26] *Wellzoom desktop filament extruder B – Wellzoom* Интернет страница: <http://wellzoomextruder.com/product/wellzoom-desktop-filament-extruder-b/> (приступљено: фебруар, 2021)
- [27] *Tensile and Water Absorption Properties of FRP Composite Laminates without Voids and with Voids*. ResearchGate, Интернет страница https://www.researchgate.net/figure/ASTM-D638-Type-IV-Tensile-Test-Specimen-Details_fig5_314253059 (приступљено: март, 2021).

[28] Slavković V., Palić N., Sharma V., Grujović N., Živić F. *Mori – Tanaka method in characterisation of composite structures*, зборник радова 16th International Conference on Tribology, Kragujevac, 2019, стр. 84 – 89, ISSN: 2620 – 2832

[29] V. Slavković, N. Grujović, A. Dišić, A. Radovanović, *Influence of annealing and printing directions on mechanical properties of PLA shape memory polymer produced by fused deposition modeling*, The 6th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Serbian Society of Mechanics, Belgrade, ISBN 978-86-909973-6-7, Mountain Tara, Serbia, 19.-21. Jun 2017., pp. Paper code I1c 1 - Paper code I1c 8.