

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Данијел З. Стојановић

**Мерење механичких карактеристика
опруга фабрификованих FDM
процесом**

завршни рад

Крагујевац, 2016.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Мерење, контрола и квалитет

Број индекса: 133/2013

Данијел З. Стојановић
Мерење механичких карактеристика
опруга фабрификованих FDM
процесом
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Васиљевић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да реализује експерименталну валидацију рада нових лабораторијских уређаја добијених у оквиру WIMB (543898-TEMPUS-1-2013-1-ES-TEMPUS-JPHES) Tempus пројекта: фабрикација опруга од ABS и PLA полимера применом FDM процеса, на 3D штампачу и њихова карактеризација на универзалном тестеру CT3 Texture Analyzer, применом теоријских основа везаних за опруге као машински елемент. Приказати начин на који су извршена мерења механичких карактеристика опруга фабрификованих FDM процесом. Мерења треба извршити на универзалној машини за тестирање узорака на притисак. Опруге су добијене од различитих пластичних материјала, па резултате мерења треба упоредити како би се одредило који материјал има боље механичке карактеристике.

Препоручена литература:

[1] Walter Michaeli, Extrusion dies for plastics and rubber, Hanser University, 2012

[2] Pierre G. Lafleur, Bruno Vergnes, Polymer extrusion, London, 2014

Крагујевац, новембар 2016

Ментор:
Проф. др Богдан Васиљевић

Садржај

1. Увод	6
2. Процес екструдирања	8
2.1 Основни елементи екструдера	9
2.2 Цилиндар екструдера	9
2.3 Алат екструдера	10
2.4 Пуж екструдера	10
2.5 Двопужни екструдер	10
2.6 Анализа рада екструдера	11
3. Врсте пластичних маса у процесу екструдирања	12
3.1. Акрилни полимери	12
3.2. Akrilonitril-Butadien-Stirol (ABS)	13
3.2.1. Прерада екстудирањем	13
3.2.2. Примена	13
3.3. Ацетат целулозе (AC)	13
3.4. Поликарбонати (PC)	14
3.5. Полипропилен (PP)	14
3.5.1. Уређај за екстудирање	14
3.6. Polivinil hlorid (PVC)	15
4. Мерење основних параметара код опруга	16
4.1. Материјали за опруге	19
4.2. Карактеристика опруге	19
4.3. Хуков закон	21
4.3.1. Примена Хуковог закона	21
4.3.2. Дијаграм напрезања	22
5. 3D штампа	24
5.1 Начин рада 3D штампача	25
5.2 Технике 3D штампања	25
5.3 Примена и значај 3D штампе	28
6. Фабрикација и тестирање опруга од ABS и PLA пластике	29
7. Анализа резултата добијених мерењем	34
8. Закључак	45
Литература	46

Резиме:

У оквиру овог рада описани су процеси екструдирања пластичних маса, као и типови и карактеристике пластичних маса који се најчешће користе. Детаљно су обрађени поступци 3D штампе којом су добијене опруге. Опруге су израђене од две различите врсте пластичних маса, ABS и PLA пластике.

Добијена опруга је тестирана оптерећењем на притискивање силом до 50kg при чему је мерена деформација опруга. Резултати су графички приказани дијаграмима зависности силе и дубине продирања индентера при различитим оптерећењима.

Кључне речи: екструдирање, пластична маса, 3D штампа, опруге, мерење механичких карактеристика

Summary:

In this paper, the extrusion processes were described as well as the types and characteristics of the plastics that are commonly used. The procedures for 3D printing are detailed, which is obtained by the springs. The springs are made of two different types of plastics, ABS and PLA plastic.

The resulting spring is tested with load on the pressing force of up to 50kg with the measured deflection of the spring. The results are plotted in diagrams depending on the force and depth of penetration of an indenter at different loads.

Keywords: extrusion, plastics, 3D printing, springs, measurement of mechanical properties

1. Увод

Опруга је еластични машински елемент који се под дејством спољашњих сила деформише, а по престанку деловања силе враћа у првобитни положај. Примена опруга је веома широка и оне се налазе у великом броју покретних делова са којима се сусрећемо свакодневно, почевши од ручних сатова, хемијских оловака, аутомобила, итд.

У зависности од тога да ли је опруга оптерећена на притискивање односно сабијање, истезање или савијање, могу се извршити разна мерења деформације опруге. Код истезања, димензија тела се повећава, док се код сабијања величина тела смањује тако да је један од примера мерења опруга управо ова деформација дужине опруге. Деформација која се јавља може бити еластична или пластична. Ако се тело после завршетка деловања силе враћа у провитни облик долази до еластичне деформације, док код пластичне деформације по завршетку деловања силе остаје у неком другом положају и добија трајну деформацију.

У раду је извршено управо мерење ове деформације, како би се одредило у ком тренутку, тј. при којој вредности силе долази до појаве трајне пластичне деформације, као и одређивања максималне силе коју опруга оптерећена притиском може издржати пре него што дође до коначног отказа, односно пуцања опруге.

Опруге су фабрификоване FDM методом 3D штампе, од различитих пластичних материјала. Опште је позната чињеница да се технологија 3D штампања развија великом брзином. 3D штампачи су полако почели да мењају свет у коме живимо, и ближи се време када ћемо моћи да одштампамо готово све што пожелимо.

Касних 1980-их година почели су се користити термини Rapid Manufacturing, затим Additive manufacturing тј. стереолитографија, да би се након неколико година у употребу увео појам 3D штампа. Амерички научници су 1986. године одштампали први тродимензионални предмет. У питању је била пластична шоља направљена техником стереолитографије. Узевши у обзир да је први једнобојни 3D штампач произведен крајем 1980-их година, а први 3D штампач у боји 2000. године, закључујемо да је тема 3D штампања релативно млада и да се управо у овом времену ради на истраживању и усавршавању коришћења 3D штампе.

Иако су поменуте машине до скоро биле доступне само малом броју људи, то више није случај јер су цене 3D штампача све ниже и приступачније. Са падом цена и повећањем способности, могућности које ови уређаји пружају полако постају неограничене. Значај 3D штампе огледа се у томе што омогућавају разним компанијама да производе ствари у својој земљи, што поспешује развој економије. 3D штампом се може правити буквално све, почевши од играчака и разних алата, па све до ватреног оружја. Чак су се појавили и 3D штампачи за храну, који штампају разне чоколадне колачиће.

Од скоро се појавила и идеја о штампању људских органа помоћу 3D штампача. Тренутно се ради на усавршавању потребне технологије, а уколико би једног дана ово

успешно функционисало, човечанство би веома напредовало. Не само да би животни век био дужи већ би и већина болести могла бити излечена на овај начин. 3D штампа се већ озбиљно примењује у медицини у виду производне разних вештачких протеза, кукова, итд.

У Кини је технологија толико напредовала да су успели да одштампају двоспратну 3D кућу. Кућа је завршена за 10-ак дана, а овај вид градње је доста јефтинији и бржи од традиционалног за који би било потребно и до пар месеци. Кућа је веома оптпорна чак и на јаке земљотресе захваљујући специјалним материјалима који се користе у 3D штампи.

Иако 3D штампачи морају још доста да се развијају како би своје место пронашли у домовима широм света, за сада се ова технологија креће у добром правцу. Цене уређаја сваким даном све више падају, појављују се нови модели, а њихове способности полако постају све савршеније. Из ове перспективе једино што можемо јесте да чекамо и видимо да ли ће за коју годину горе поменуте тврдње престати да буду само научна фантастика и постати свакодневница.

За потребе експеримента у овом раду, штампане су опруге од различитих пластичних маса. Пластична маса је добијена процесима екструдирања и у облику жице која се доводи у 3D штампач, док се модел опруге који ће бити штампан увози компјутерски из неког од CAD/CAM система у облику моделске форме.

На почетку рада детаљно је описан принцип рада екструдера, као и основни елементи саме машине. Ови поступци су врло битни код 3D штампе јер се помоћу њих добијају танке жице које сам 3D штампач користи за израду модела.

Други део рада даје опис најзначајнијих типова пластичних маса које се користе при обради екстудирањем. Такође су описане најважније карактеристике тих пластичних маса.

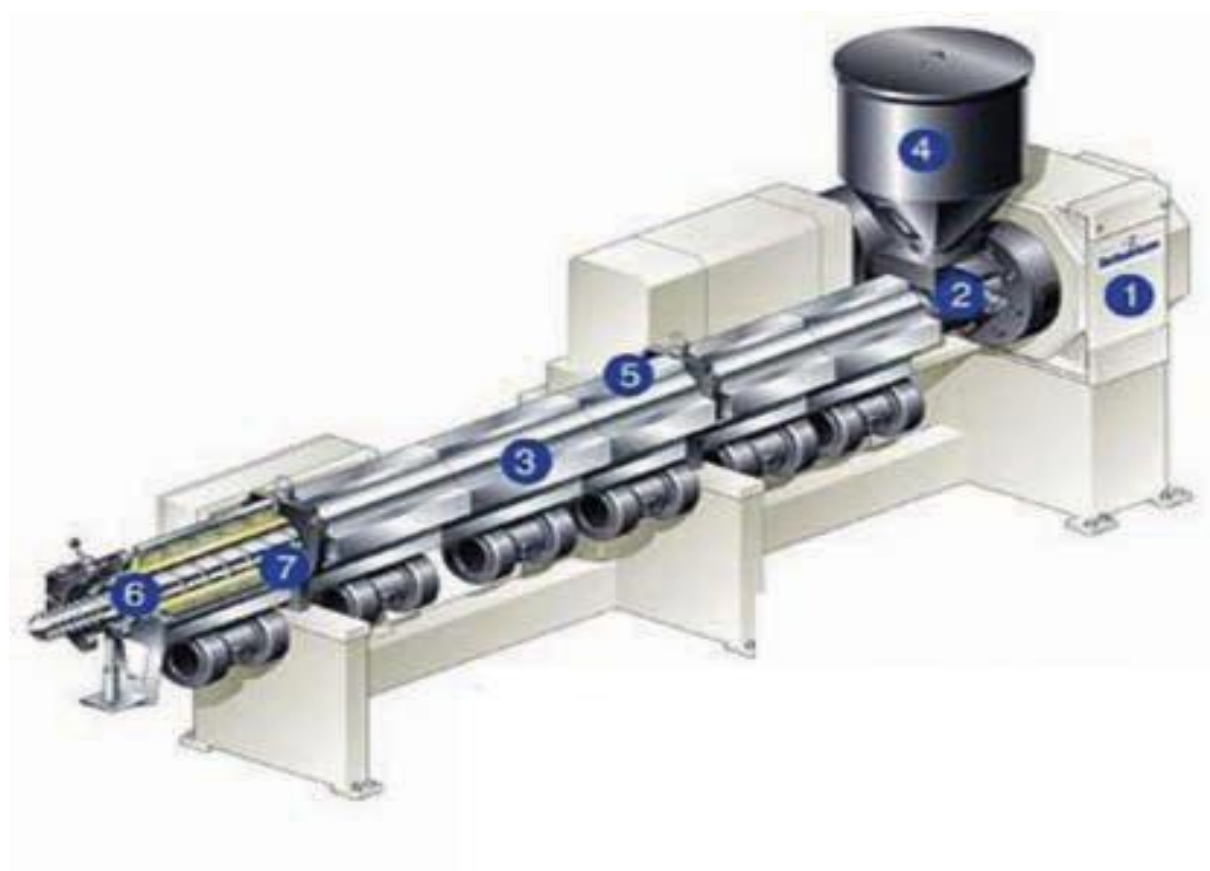
Након тога дат је начин рада 3D штампача, описане су технике које се користе при 3D штампању и дати су примери настали 3D штампом.

Затим је дат преглед основних подела опруга, дате су основне карактеристике крутости опруга и описан Хуков закон. Опруге су испитиване на универзалном машином за притисак.

На крају рада дати су резултати добијени мерењем опруга добијених 3D штампом, које су оптерећене на притисак.

2. Процес екструдирања

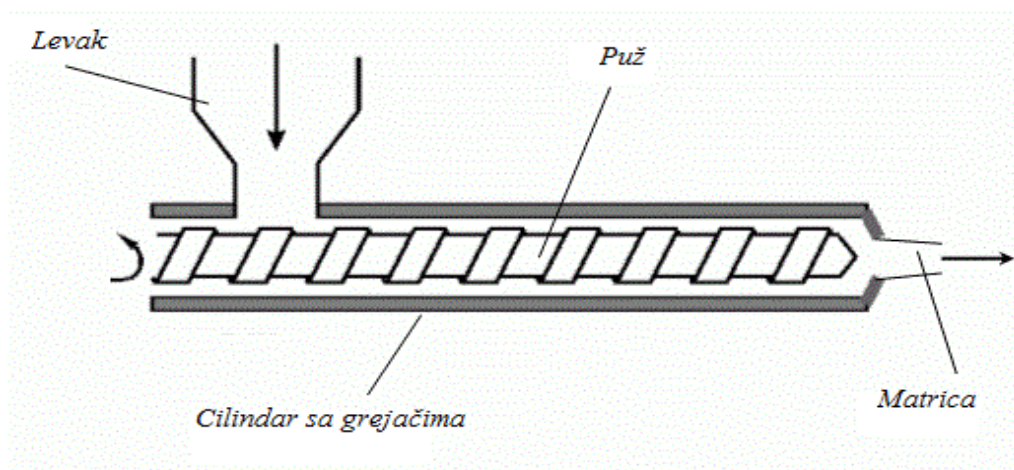
Екструдирање је континуиран поступак прераде пластичних маса. Овим поступком пластична маса, као полазна сировина, у праху или што је најчешће гранулату разних облика убацује се путем левка у цилиндар машине у којој је смештен један или више пужева, који пластичну масу транспортују, а под утицајем доведене топлоте преводе је у течно стање. Дејством погона за обртање пужа као и савлађивањем отпора који настају транспортовањем растопљене пластичне масе, кроз отворе између пужа и цилиндра, маса се пластицифира, хомогенизира и на концу у алату машине формира се у жељени облик. Ова машина у којој се одвија поменути процес прераде пластике зове се екструдер [1].



Слика 2.1. – Екструдер (1-Покретачка јединица, 2-Транспортни део са жлебом цилиндра, 3-Зона за грејање и хлађење, 4-Левак, 5-Отвор за усисавање гасова и непожељних материја, 6- Пуж) [1]

2.1 Основни елементи екструдера

Данас се најчешће користи тип једнопужног екструдера у индустрији пластике. На слици 2.2 шематски је приказан једнопужни екструдер, са својим основним елементима. У свом најједноставнијем облику екструдер се састоји из левка, отвора за дозирање сировине, цилиндра, у ком се креће истопљена маса и у коме је смештен пуж, који има задатак да транспортује масу дуж цилиндра до отвора на који се поставља алат за добијање жељеног производа. За погон се користи мотор који преко система преносника и редуктора врши обртање пужа. За грејање цилиндра користе се електрични грејачи, док се за темперирање и хлађење користи систем циркулације воде или ваздух. За исправан рад пужа, нарочито дела који се спаја с редуктором, користе се специјални лежајеви, ради спречавања евентуалних вибрација, а врши се и темперирање и хлађење тог дела пужа. Код двопужног и осталих типова екструдера сви наведени елементи су исти, или с истим функцијама, разлике су само у транспорту истопљене масе [1].



Слика 2.2. Шематски приказ једнопужног екструдера [2]

2.2 Цилиндар екструдера

Цилиндар и пуж екструдера чине најважније елементе машине. Пуж и цилиндар треба да транспортују гранулат или прах полимера, да га топе и избацују при константном притиску и температури. Да би се постигло топљење масе, цилиндар екструдера се загрева споља, а та топлота уводи се на унутрашњи зид цилиндра [1].

Температуру цилиндра од дозера до алата треба регулисати у зависности од топлотних особина материјала који се прерађује. Сваки материјал има свој одређени температурни програм, који се регулише грејањем цилиндра [1].

У циљу боље регулације цилиндра, од левка за дозирање до места изласка масе цилиндар је подељен у 3-6 зона грејања. Поред загревања, цилиндар се, истовремено, хлади водом или ваздухом, ради одвођења сувишне топлоте. Део цилиндра у коме се налази отвор за убацивање материјала мора се ефикасно хладити, да би се спречило топљење материјала на самом улазу, које би изазвало слаб транспорт материјала кроз цилиндар, као и спречавање преноса топлоте на лежајеве [1].

2.3 Алат екструдера

Алат је смештен на самом излазном делу екструдера и конципиран је тако да је осигурано лако монтирање и демонтирање. Материјал од кога је алат направљен је челик високе тврдоће или челици отпорни на корозију [3].

За конструкцију алата не постоје неке егзактне методе. Углавном је конструкција алата везана за крајњи производ, а не за материјал. Такође, важан фактор је величина екструдера, који може давати производе само у одређеним границама [3].

2.4 Пуж екструдера

Од свих делова екструдера, пуж је најзначајнији. Облик, димензије и материјал од кога је израђен су у функцији материјала који се прерађује, производа, алата, итд. Не постоји универзални пуж, и сваки материјал који се прерађује зависи од његове врдоће, температуре, коефицијента трења, специфичне топлоте, корозивног дејства и других особина материјала [2].

2.5 Двопужни екструдер

Екструдери с два пужа у међусобној спрези називају се двопужни екструдери. Главна разлика у принципу рада између једнопужног и двопужног екструдера је у начину транспорта материјала у машину. Једнопужни екструдер користи трење између материјала и цилиндра за транспорт материјала, док се код двопужног екструдера сировина у улазној зони транспортује принудно [1].

Тако транспорт пластичног материјала није зависан од коефицијента трења између зида цилиндра, материјала и пужа, а тиме ни од облика и врсте сировине. Удео процеса смицања и трења код двопужног екструдера је знатно мањи због релативног кретања масе између пужа и цилиндра, јер код њега маса подлеже ефекту гњечења [1].

Примена двопужног екструдера нема неких одређених специфичности у односу на једнопужни. Најчешће се користи за прераду PVC тврдог материјала из праха и гранула, за производњу цеви великог пречника из PVC, PP, PE, итд. Такође, користи се за примене где је потребан ефекат компримирања и гњечења, као на пример при изради цеви и профила директно из праха [1].



Слика 2.3. Пуж и цилиндар код двопужног екструдера [4]

2.6 Анализа рада екструдера

У обичном екструдеру за производњу пластичних производа полимер пролази кроз три стања: у почетку то је чврсти материјал, затим смеша растопљеног и чврстог материјала и, на крају, растопљени материјал. Најједноставније се може анализирати зона истискивања, пошто се на ову зону могу у потпуности применити закони хидродинамике вискозних течности. Зона истискивања игра велику улогу у екструдеру, пошто углавном она одређује проточни капацитет. У зони истискивања учествују три основна протока. Принудни проток представља течење растопине, које је последица релативног кретања пужа и цилиндра. Проток, који се може сматрати као течење растопљене пластичне масе у супротном смеру, настаје под утицајем градијента притиска који је усмерен од алата машине ка њеном улазу. Трећа компонента протока је цурење кроз зазоре на зубима пужа.

3. Врсте пластичних маса у процесу екструдирања

Велика већина свих термопластичних материјала који се сад производе подвргнути су екструзији у некој фази производње. Треба имати у виду да и остали процеси у пластици, који обично нису везани с екструзијом, употребљавају екструдере за помоћне функције. На пример, екструдери се користе и при обликовању дувањем и при обликовању бризгањем пластичних маса [1].

За процес екструзије данас се искључиво користе термопластичне масе, односно пластичне масе, које могу под утицајем температуре да претрпе перманентну деформацију а да се притом њихова физичка и хемијска структура знатно не промени. Ова перманентна способност деформисања облика, под утицајем топлоте, и враћања у првобитно стање је основна особина термопластичних маса [1].

3.1. Акрилни полимери

Прерађују се техником бризгања и екструдирања. Главне особине су:

- Нису подложни старењу
- Отпорни су на топлоту, светло и деловање атмосфере
- Имају леп сјај површине
- Одликују се великом тврдоћом и добрим својствима жилавости
- Пламиште је изнад 350°C
- Отпорни су на воду, алкалије и слабе киселине
- Физиолошки су индиферентни, без мириса и укуса.

Могућности екструдирања одређује степен полимеризације, као и величина и пресек готовог предмета. За екстудирање акрилних материјала употребљава се пуж са сталним дубинама навоја. Пре почетка екстудирања екструдер је потребно загрејати на 100°C. За време рада екструдер је потребно лагано хладити, да не би дошло до прегревања материјала. Услед прегревања материјал изгуби боју и деполимеризира. Зато је потребно безусловно обезбедити ламинарно кретање материјала да се не би задржавао у цилиндру или алату. Ипак потребно је с времена на време размонтирати екструдер, извадити пуж и очистити цилиндар. Екструдер, при преради полимера, је потребно путити у рад с малом брзином, а материјал се мора безусловно сушити. Ако екстудирање вршимо на вишим температурама од дозвољених добићемо производ са слабијим квалитетом, који излазећи из алата лако пуца. Готов производ који излази из алата не сме се одмах хладити, јер се код наглог хлађења појављују пликови на предмету. Индустриски најпознатији акрилат је polimetilmetakrilat (PMMA) [1].

3.2. Akrilonitril-Butadien-Stirol (ABS)

ABS је име изведено од компонената (Akrilonitril-Butadilen-Stirol). По својим својствима сличан је полистирену PVC и полиамиду [1].

Одликује се добром способношћу прераде на екструдерима, изандредном жилавошћу у широком распону температура, доброг ударном чврстоћом, отпорношћу на хабање. Отпоран је на ниским температурама. Због свих ових особина спада у ред високо квалитетних термопласта. Производи се у разним варијантама и за разне примене [1].

3.2.1. Прерада екстудирањем

Ради боље хомогенизације масе за прераду ABS, користе се углавном једнопужни екструдери. Код прераде ABS неопходно је сушење гранулата и издвајање влаге која мора бити испод 0,1%. Сушење се врши у сушницама, или помоћу вакуума у самом екструдеру [1].

3.2.2. Примена

Један од производа ABS су плоче за унутрашње стране фрижидера, ојачане са стакленим влакнима, могу се одлично користити и за израду чамаца и делова аутомобила. Цеви и профили се користе у специјалне сврхе у прехранбеној, фармацеутској и хемијској индустрији.

3.3. Ацетат целулозе (АС)

Одликује се великом чврстоћом на удар, доста је отпоран на хабање и ломљење. Добро се обрађује, најчешће се обрађује поступком бризгања, али прерађује се и екструзијом у плоче, цеви, профиле и фолије [1].

Екстудирање овог материјала може се успешно вршити на свим уобичајеним екструдерима за прераду осталих термопластичних материјала, али је за добру прераду потребан пуж екструдера за целулозни ацетат [1].

Цеви од целулозног ацетата се одликују извандредно глатком и сјајном површином. Као такве оне не стварају отпор протицању течности, нису подложне корозији, лагане су, по потреби могу бити провидне што им даје предност над цевима од других пластичних материјала. Од целулозног ацетата се могу израђивати разни пљоснати профили или профили било ког облика, који имају различите намене [1].

3.4. Поликарбонати (PC)

Спадају у групу веома тврђих термопластичних маса групе засићених полиестера. Имају добра механичка својства слична металима, стабилност димензија, постојаност облика на деловање топлоте у температурном подручју од 100-140°C, постојаност према атмосферским променама, транспарентност и високи сјај површине.

При преради у екструдерима захтева обавезно претходно сушење материјала у сушници на око 110-120°C у трајању од око 1 сата, а тек онда се дозира у екструдер. Дозирање се препоручује аутоматско, како би се више избегао контакт са спољном средином [1].

Екструдирање се обавља са вишестепеним пужом. Екструдер обавезно мора поседовати отвор за извлачење влаге вакуумом. Да не би дошло до оштећења екструдера, њега треба загревати 1 до 2 сата пре употребе. Екструдирање плоча и цеви захтева мало већу дужину хлађења него прерада осталих термопластичних маса. Остала опрема за екструдирање је уобичајена [1].

Примена овог пластичног материјала је, практично, неограничена и само је цена, фактор који му сужава поље примене [1].

3.5. Полипропилен (PP)

Полипропилен спада у термопластичну масу с најнижом специфичном тежином, и одликује се извандредном механичким а посебно хемијским особинама, односно високом отпорношћу на утицај киселих оксиданата, па се управо, због тога масовно користи у погонима хемијске индустрије, где су медији врло агресивни [1].

Добија се из гасовитог пропилена, на температури 200-220°C, уз присуство Зиглеровог катализатора [1].

У току процеса полимеризације полипропилена образује се и активни полимер или полипропилен атактичког типа. Атактички полипропилен се користи за оплемењивање битумена, док за прераду пластике, користи нормални тип. У преради екструзијом изотактички полипропилен највише се прерађује у цеви, плоче и влакна [1].

3.5.1. Уређај за екструдирање

Већина конвенционалних екструдера, с једним или два пужа, може се успешно користити за екстудирање полипропилена. Температуре масе у екструдеру варирају према типу полипропилена који се екстудира. Обично температура масе мора да буде таква да се добије температура отопине од око 240°C на алату, међутим за производњу филма у алату користе се и више температуре [1].

Како код полиетилена, тако и код полипропилена, при високим притисцима смицања материјала, долази до турбулентног протока материјала, па према томе, сам алат мора бити тако конструисан, да обезбеди правила ток отопине. Увођење материјала мора да буде постепено [1].

3.6. Polivinil hlорid (PVC)

Спада у ред најстаријих пластичних маса, али због својих добрих механичких и хемијских особина задржао се и до данас. Производи се у више типова као меки, полутврди и тврди PVC [1].

Изразита разлика између PVC-а у омекшаној форми и PVC-а употребљеног у тврдом облику јесте у садржају омекшивача. PVC с високом молекуларном тежином без омекшивача карактеристичан је по тврдоћи, жилавости и високој хемијској отпорности. Ако се тај материјал модификује, ради проширења примене, повећавањем флексибилних својстава, физичка и хемијска својства му се зназно промене [1].

Проблематика прераде PVC је веома сложена. При преради меког PVC могу се користити екструдери који су у употреби за остале термопласте, док при преради тврдог PVC, препоручује се наменски екструдер [1].

Велика одступања у температури прераде су последица различите примене и различитог састава смеше PVC. Примена PVC је врло широка и користи се за израду цева, цеви, профила, облагање каблова и зица, итд [1].

4. Мерење основних параметара код опруга

Опруга је машински елемент који се користи за остваривање еластичних спојева. Под деловањем силе долази до деформације опруге, а по престанку деловања силе враћају се у првобитни положај. Под утицајем спољних сила акумулира се енергија, а након растерећења се враћа у облику потенцијалне енергије [11].

Употреба опруга има широку примену. Неки од најчешћих примера употребе су:

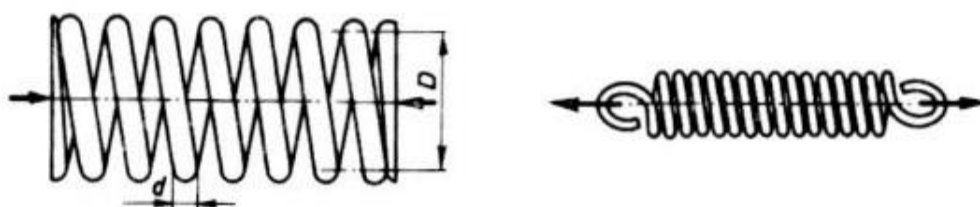
- акумулација енергије (опруге за погон механизма у сату и у играчкама)
- пригушивање удараца и вибрација (опруге на возилима, у намештају)
- враћање у првобитни положај (вентили мотора, папуче кочница)
- ограничавање силе (сигурносне спојнице, сигурносни вентили)
- мерење силе (динамометри, ваге)

Постоји широк спектар опруга који су доступни, али се по потреби могу и дизајнирати за одређене сврхе. Циљ овог поглавља је да уведе у технологију опруга и прикаже главне врсте опруга [17].

Подела према врсти напрезања:

1. Торзионе опруге - Основно напрезање у опрузи је торзија (увијање).

а) Завојне торзионе опруге: По смеру деловања силе могу бити притисно оптерећене и затезно оптерећене.

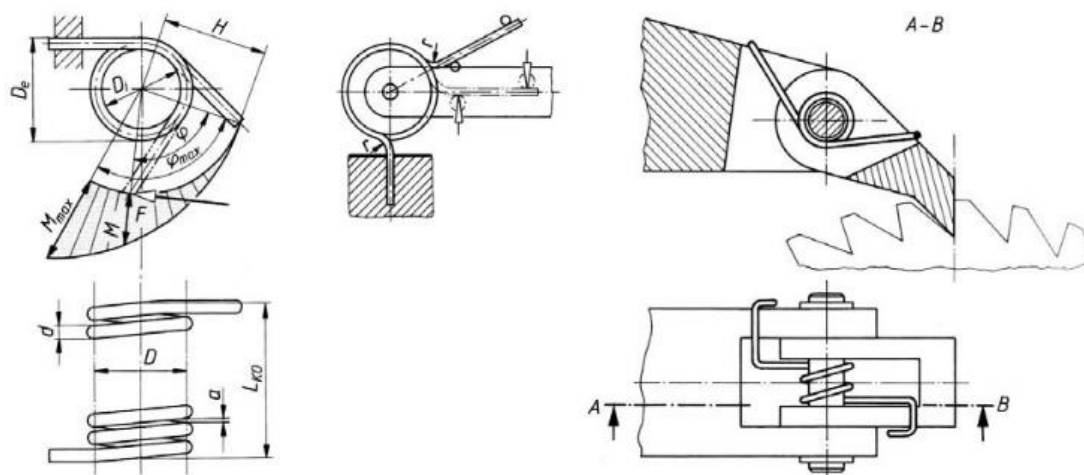


Слика 4.1. Приказ притисно и затезно оптерећене опруге [11]

б) Торзиони штапови – на крајевима штапа делује момент торзије T . Користе се нпр. код момент кључева.

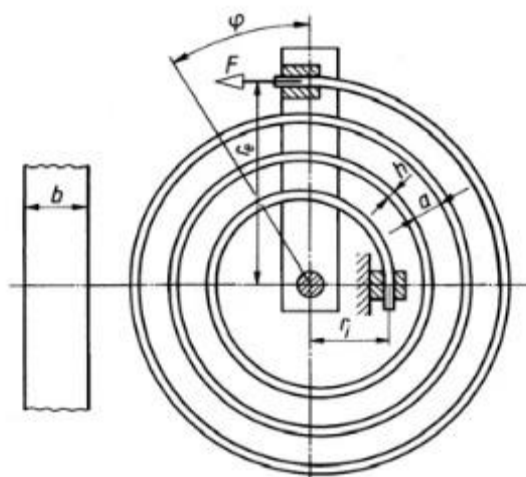
2. Флексионе опруге – Основно напрезање у опрузи је савијање (флексија).

а) Завојне флексионе опруге – Користе се код штипаљки, ручне кочнице аутомобила, разних поклопаца, итд.



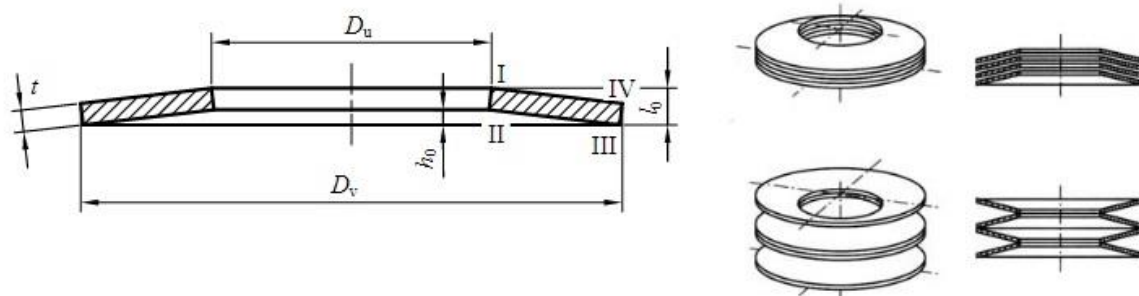
Слика 4.2. Завојне флексионе опруге [11]

б) Спиралне флексионе опруге – Израђују се из челичних трака. Користе се код сатова, играчки, мерних инструмената, итд.



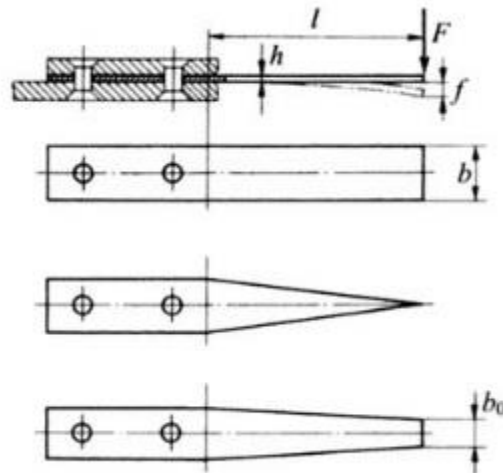
Слика 4.3. Спирална флексиона опруга [11]

ц) Тањирасте флексионе опруге – Разним начинима слагања добијају се пакети опруга разних крутости. Користе се код цевовода, кука дизалица, постоља, итд.



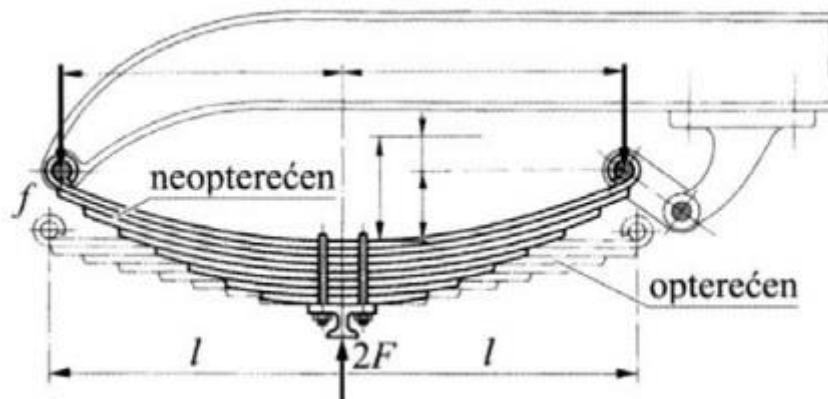
Слика 4.4. Тањирасте флексионе опруге [11]

д) Лиснате флексионе опруге – Једноставне (једнослојне) се користе као контактне опруге у склопима.



Слика 4.5. Једнослојне лиснате опруге [11]

-Вишеслојне – користе се код возила (камиони, возови, кочије) како би претварали круте ударе у дуге пригушене ударе. Углавном се користи назив “гибањ”.



Слика 4.6. Вишеслојне лиснате опруге [11]

3. Затезно/притисне опруге

- Металне прстенасте опруге
- Гумене опруге
- Зрачне опруге

4.1. Материјали за опруге

Када у обзир узмемо доступност материјала, квалитет, цену и усклађивање са радним процесима, тада можемо одабрати најпогоднији материјал. Када дође до отказа опруге, потребно је проучити квалитет материјала од кога је опруга израђена, као и историју производног процеса којим је опруга настала [15].

Опруге се углавном израђују од челика. У групу челика за опруге могу се сврстати угљенични челици за побољшања и челици легирани силицијумом, хромом, ванадијумом или волфрамом [12].

Користе се и други материјали за опруге, нпр. месинг, као и неметали (гума, PVC, ...). Полуфабрикати за израду опруга су: жице, шипке или траке вруће ваљане, хладно вучене или хладно ваљане [12].

Висока чврстоћа челичних материјала за опруге омогућава висока напрезања па такве опруге могу бити веома малих димензија. Висока чврстоћа постиже се каљењем, накнадним попуштањем, сачмарењем површине и другим поступцима, а што је нарочито важно код динамичких оптерећења [12].

4.2. Карактеристика опруге

Коефицијент крутости опруге је однос промене силе F и припарајуће промене угиба s :

$$R = \frac{\Delta F}{\Delta s} \text{ (N/mm)}$$

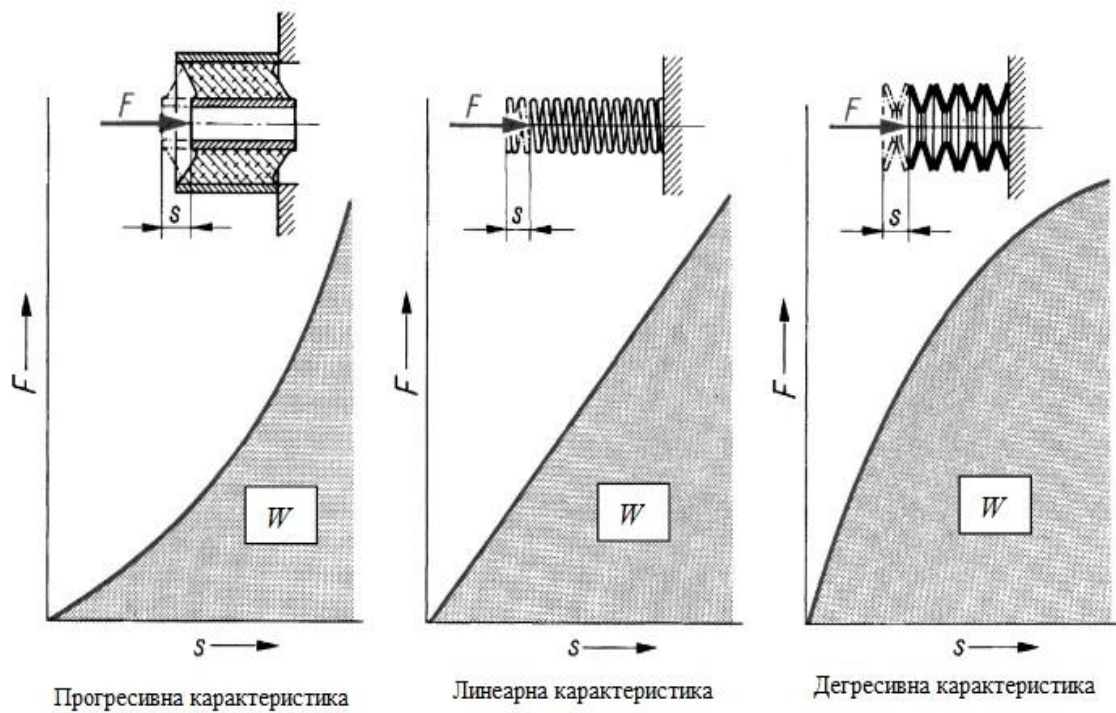
односно однос промене торзионог момента T и угла увијања φ :

$$R = \frac{\Delta T}{\Delta \varphi} \text{ (Nmm/rad) или (Nmm/}^\circ\text{)}$$

Ако се с повећањем силе опруга све теже деформише, карактеристика је прогресивна (крутост опруге расте). Овакве су гумене опруге, коничне завојне торзионе опруге, као и завојне торзионе опруге с променљивим кораком [11].

Ако се коефицијент крутости R с повећањем угиба s , односно угла увијања φ не мења, тј. константан је, опруга има линеарну карактеристику. Овакве су завојне торзионе опруге и торзијски штапови [11].

Ако се с повећањем силе опруга све лакше деформише, карактеристика је дегресивна (крутост опруге пада). Овакве су тањирасте опруге [11].



Слика 4.7. Графички приказ карактеристике опруге [11]

Рад W који опруга акумулира приликом деформисања једнак је површини испод криве:

- код транслацијских померања $W = \int F \cdot ds$ (J) или (Nmm)
- код ротацијских померања $W = \int T \cdot d\phi$

Ако је нагиб линије у дијаграму стрм, потребна је велика сила за мали угиб, тј. опруга је крута(тврда). Ако је нагиб линије положен опруга је мека [11].

4.3. Хуков закон

Хуков закон каже да је деформација тела пропорционална примењеној сили под условом да се не пређе граница еластичности тела. Када се сила уклони тело ће се вратити у свој првобитни облик [13].

Ако се тело на еластичној опрузи помери из равнотежног положаја, тј. ако се опруга растегне или притисне, деловаће повратна сила (еластична сила опруге), која ће настојати тело вратити у равнотежни положај. Износ те силе је пропорционалан померају тела из равнотежног положаја. Дакле, ако је померај X , повратна сила је:

$$F = -kx,$$

где је: F – сила коју опруга производи, знак “-” означава супротан смер од помераја. Ако је опруга истегнута, њена сила ће тежити да је скупи и супротно, ако је опруга скупљена, сила опруге ће тежити да је рашири; коефицијент пропорционалности k – константа опруге и зависи од њених димензија, облика и материјала од кога је израђена; x – означава промену дужине при истезању или скупљању опруге у односу на њен основни природни положај [13].

Хуков закон важи за широк спектар еластичних тела, која се називају линеарно-еластичним телима, при деформацијама (истезање, увијање и сл.) које она трпе под утицајем сила. За свако такво тело, закон важи само у одређеним границама карактеристичним за њега – напон не сме прећи тзв. границу еластичности. Линеарни однос између деформације и напона је одређен константом пропорционалности, која се у зависности од типа деформације различито назива, такође карактеристичном за дато тело. Граница еластичности као и константа пропорционалности зависи од природе материјала од кога је тело направљено и од његових осталих особина [13].

4.3.1. Примена Хуковог закона

Ако је шипка или штап од неког еластичног материјала, онда и њу можемо посматрати као опругу. Шипка има дужину L и попречни пресек A . Ако шипку развлачимо неком силом F , онда у њој настаје напрезање σ , које се опире спољној сили. Тада Хуков закон можемо писати у другом облику:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \text{ или } \Delta L = \frac{F}{E \cdot A} \cdot L = \frac{\sigma}{E} \cdot L,$$

где је: σ – напрезање у шипки или штапу (N/mm^2), E – Young-ов модул еластичности (N/mm^2), ϵ – однос продужења шипке или штапа и њене дужине (без димензије или $\Delta L/L$), L – дужина штапа, ΔL – продужење шипке или штапа (mm), F – сила која продужује шипку или штап (N), A – попречни пресек шипке или штапа (mm^2) [13].

Хуков закон вреди само у одређеном подручју неког материјала, које се назива еластично подручје. За челик је еластично подручје све до границе развлачења или где та граница није јасно одређена, до границе пластичности која је одређена оним напрезањем при којем настаје трајно продужење од 0,2% првобитне дужине шипке или штапа. Ово напрезање носи ознаку $\sigma_{0,2}$ [13].

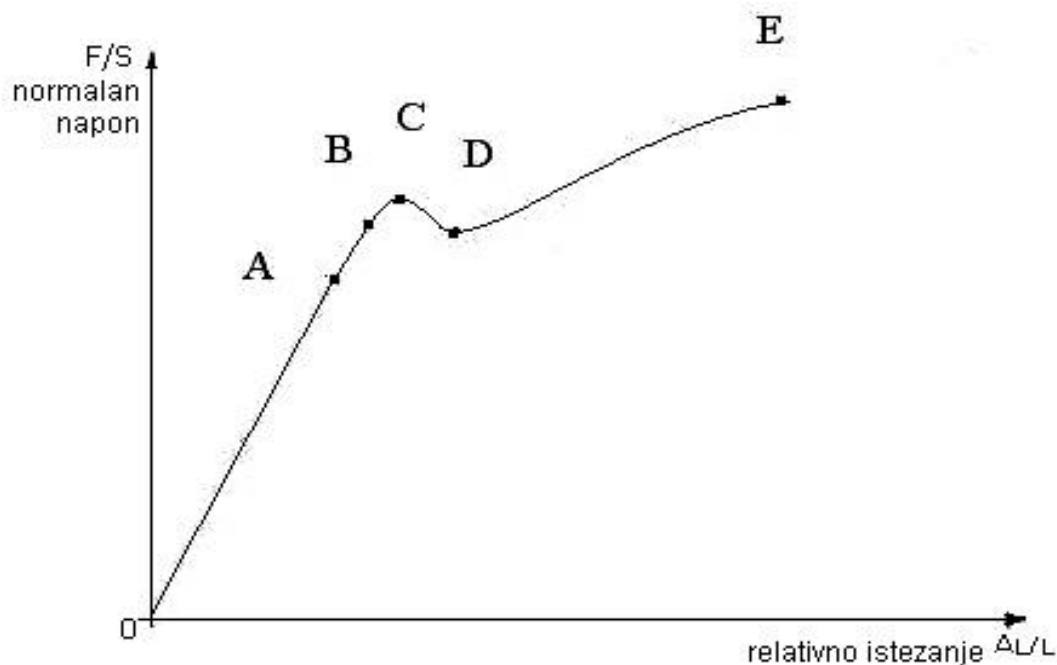
4.3.2. Дијаграм напрезања

Дијаграм напрезања приказује међусобну зависност σ – нормалног напона и ϵ – релативног истезања. У материјалу који је оптерећен неком силом F настају напрезања σ која узрокују његово растежање. Напрезање σ је однос силе F и површине A пресека штапа или шипке:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Због деловања силе F штап или шипка ће се од почетне дужине L_0 растегнути на дужину L . Тако је продужење штапа или шипке:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$



Слика 4.8. Експериментални график Хуковог закона [14]

- OA – област у којој важи Хуков закон
- AB – област у којој не важи Хуков закон
- OB – област еластичних деформација
- Нормални напон у тачки A назива се граница пропорционалности, а у тачки B граница еластичности
- BC – пластичне деформације
- CD – тело се понаша као флуид (не пружа отпор промени дужине)

- Изнад тачке D расте отпор истезању
- E – граница чврстоће тела (при том напону долази до кидања тела) [14]

Релативно издужење ε је издужење с обзиром на почетну дужину L_0 . Почетно напрезање је линеарно. У подручју линеарног истезања материјал је еластичан и након престанка деловања силе, односно напрезања, он се враћа у почетно стање. Young-ов модел еластичности је однос напрезања и релативног издужења (у подручју еластичности) [13].

Техничка граница еластичности је напрезање при којем осетљива мерила осете прво приметно трајно издужење материјала (при још непромењеном пресеку A_0). Након те границе материјал се растеже пластично и након престанка деловања силе не враћа се више на почетну даљину L_0 , већ остаје одређено трајно издужење, уз сужење пресека ($A < A_0$) [13].

5. 3D штампа

3D штампа је модерна технологија производње тродимензионалних објеката. У тродимензионалној штампи објекат се креира сукцесивним наношењем слојева материјала. 3D штампа представља генерално брже, јефтиније и лакше решење од других технологија производње 3D објеката. Омогућава израду макета делова и склопова од више различитих материјала, различитих механичких и физичких својстава у јединственом процесу. Ова технологија производи моделе који верно oponaшају изглед, утисак и функционалност производа прототипа [5].

У последњих неколико година 3D штампачи су постали финансијски доступни малим и средњим предузећима, чиме се израда прототипа помера из тешке индустрије и у канцеларијско окружење. Сада је могуће истовремено уклапање различитих врста материјала. Осим израде прототипова, 3D штампачи нуде велики потенцијал за производњу различитих апликација у области производње накита, обуће, индустријског дизајна, архитектуре, аутомобилске индустрије, авио, стоматолошке и медицинске индустрије.



Слика 5.1. Изглед 3Д штампача [6]

5.1 Начин рада 3D штампача

За разлику од разних машина (стругови, бушилице, тестере), које од великог комада материјала одузимају вишак, 3D штампачи полазе ни од чега и производ стварају тако што додају материјал. Тај материјал може да буде растопљена пластична маса, која се помоћу екструдера селективно полаже по X оси. Када се једна линија заврши, глава диспензера се враћа, помера се за један воксел по Y оси, па се поступак понавља у круг. Након завршетка једног хоризонталног слоја, започети објект се спушта за један воксел и све се понавља са наредном Z координатом.

Сваки поступак 3D штампања започиње дигиталним CAD фајлом, који је креиран у неком од програма за 3D моделирање или је скениран 3D скенером. Да би се из дигиталног фајла добиле инструкције које 3D штампач разуме, софтвер сече 3D објект на стотине или хиљаде хоризонталних слојева. Након тога, 3D штампач чита овај фајл, и наставља креирање сваког слоја. Након што су се сви слојеви креирали, они постају једна целина без видљивих граница између слојева, па се као резултат добија тродимензионални објект.

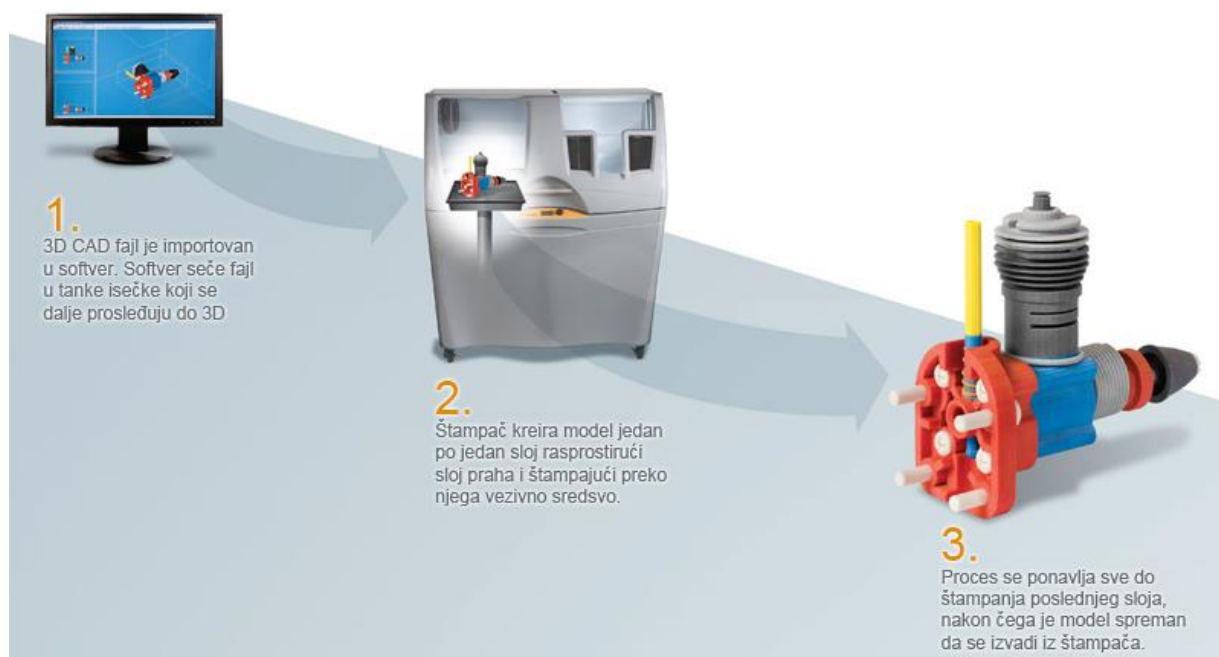
Објект се гради од слојева растопљене пластичне масе, која се одмах хлади и очвршћава. Обично се користи ABS или биоразградива PLA пластика у облику нити која се механички доводи до места топљења у покретном екструдеру 3D штампача. Заједно са материјалом за градњу објекта доводи се материјал за привремену поуну празних делова објекта, који се по завршетку посла одстрањује. Овим је омогућено штампање облика који би иначе били неизводљиви. Осим пластике може се користити низ других материјала, као што је гума, синтетички камен, па чак и храна. Постоје и џиновски 3D штампачи који граде куће од специјалног бетона.

5.2 Технике 3D штампања

По техници 3D штампања можемо разликовати следеће технологије:

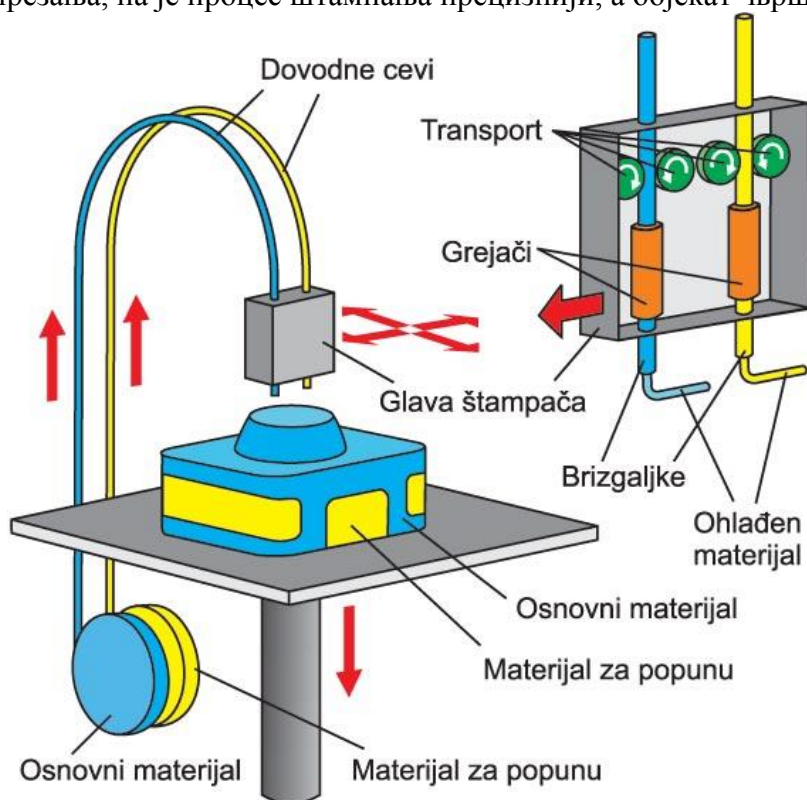
- Inkjet
- Fused Deposition Modeling (FDM)
- Стереолитографија
- Селективно ласерско ситеровање (SLS)
- Производња објекта ламинацијом (LOM)

Inkjet – Један од основних начина 3D штампе је у ствари надоградња на класичан Inkjet штампач. Модел се прави један по један слој, а inkjet распршује везивно средство у облику модела који се штампа. Предности ове методе огледају се у брзини израде модела и што је ово једини метод који омогућава израду модела у пуној боји. Недостатак је квалитет израђеног модела, јер су веома крхки [7].



Слика 5.2. графички приказ инкјет штампања [7]

Моделирање фузионим таложењем (Fused deposition modeling – FDM) је најједноставнија категорија 3D штампача, а цена им се креће од неколико стотина до неколико хиљада евра. Скупљи модели су оклопљени комором у којој се одржава константна температура, чиме се постиже жељена брзина хлађења што неутралише механичка напрезања, па је процес штампања прецизнији, а објекат чвршћи [8].

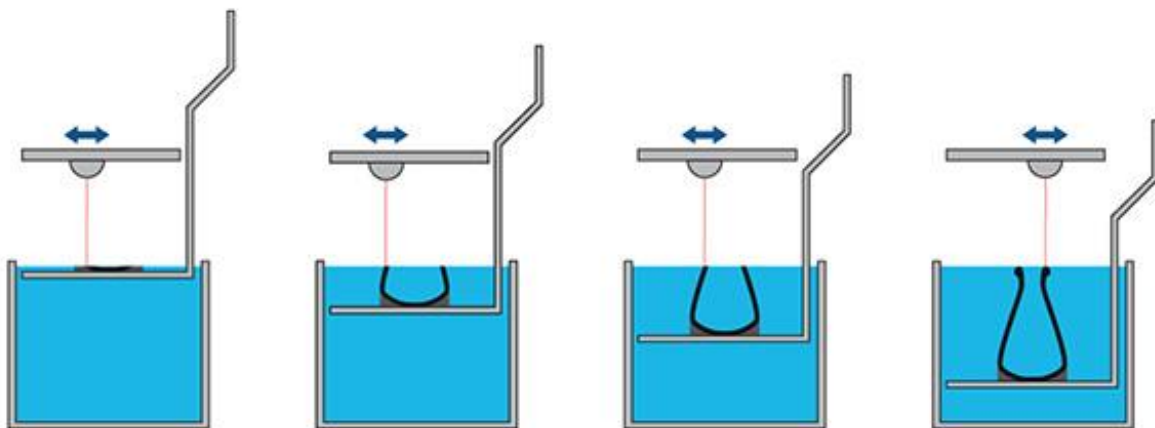


Слика 5.3. Принцип рада FDM штампача [8]

FDM технологија 3D штампе ради по принципу слагања материјала по слојевима. FDM метода користи софтвер који обрађује STL фајл (Stereolithography fille format). Након тога модел се у новом програму сецка како би се изградио комплетан процес по слојевима. Модел се креира екструдирањем пластичног материјала који формира слојеве, док се материјал стврдњава након екструзије из млазнице. Млазница се загрева како би се топио материјал и може се кретати вертикално и хоризонтално помоћу нумерички контролисане машине. Степ мотори се користе за померање главе која истискује материјал [16].

Стереолитографија – Материјал који се користи за израду прототипа је полимерна течност која се просипа по носећој конструкцији у танком слоју. С обзиром да ова течност има особину да се под UV зрачењем ласерске јединице стврдне, течност се врло брзо претвара у чврсто стање, где год ласер осветљава полимер. Након што је читав слој завршен, празнине се допуњавају потпорним материјалом, читав слој спушта се ниже по вертикалној оси штампача и следећи слој се наноси на претходни [7].

Предности стереолитографије су: прецизност, одличан квалитет и способност да користи широк спектар материјала. Недостатак је тај што су материјали и остаци материјала токсични [7].



Слика 5.4. Графички приказ стереолитографије [7]

Селективно ласерско ситеровање (Select laser sitering – SLS) – Процес израде SLS методом је сличан стереолитографији. У овој методи UV светло замењено је ласером, а полимерна течност је замењена прашкастом базом. Код ове методе је могуће користити разне врсте материјала за израду, као што су разне врсте метала, керамике, пластике, итд. Направљени делови су изузетно квалитетни и издржљиви, а ова метода гарантује и високу прецизност. Недостатак се огледа у високој цени машине.

Производња објеката ламинацијом (Laminated object manufacturing – LOM) – Материјали који се користе код ове методе су најчешће папир или пластика који су исечени ласером или сечивом, који се на крају спајају лепком на воденој бази. Овим се постиже приступачна цена израде модела, због ниске цене материјала (папира и лепка). Предност ове методе је што не штети околини. Недостаци су у ограниченом избору материјала, и слабој чврстоћи произведених делова.

5.3 Примена и значај 3D штампе

Данас се углавном 3D штампа користи за израду прототипова у производњи или за израду модела који ће касније омогућити производњу финалних производа. Такође је могуће штампати многе ствари за свакодневну употребу као што су аутомобили, накит, пластичне играчке, пластичне боце, итд. Ова метода израде је омогућила да предмет добијемо у кратком временском року, уместо чекања на израду алата и изливање у скупим калупима.



Слика 5.5. Предмети настали 3D штампом [9]

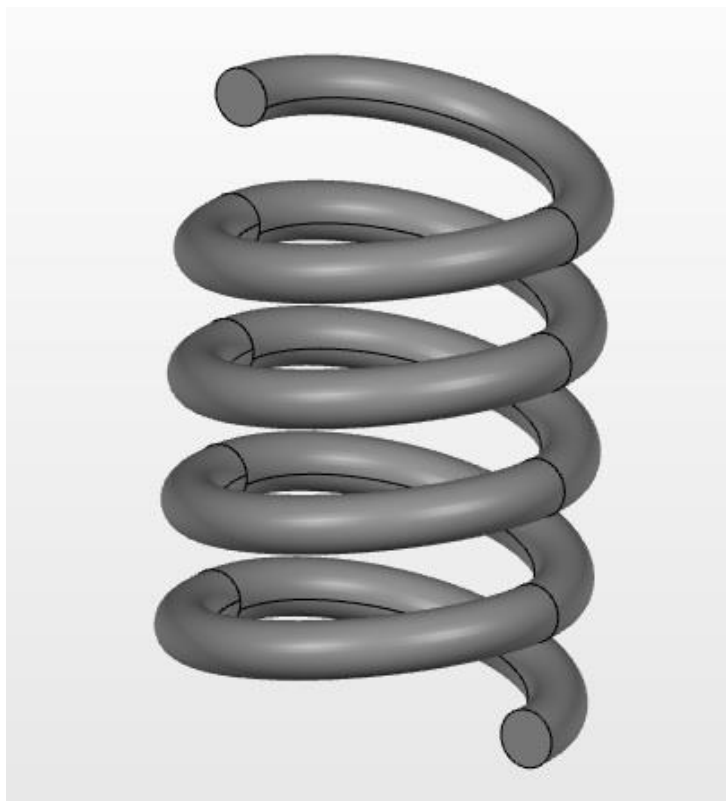
Такође је могућа примена у стоматологији, где би се у складу са коришћеним материјалима могли 3D штампати и керамички зуби и навлаке који би се могли користити годинама, као и штампање разних врста протеза и помагала за крајњу потрошачку употребу.



Слика 5.6. Приказ керамичке протезе настале 3D штампом [10]

6. Фабрикација и тестирање опруга од ABS и PLA пластике

Први корак у фабрикацији опруга 3D штампом је креирање 3D модела опруге у неком од CAD/CAM система у коме ће бити одређене све потребне димензије за израду опруге. Изглед 3D модела који је коришћен у овом случају је приказан на слици 6.1. Дати модел који се користи као улазни податак за 3D штампач мора бити у .STL формату.

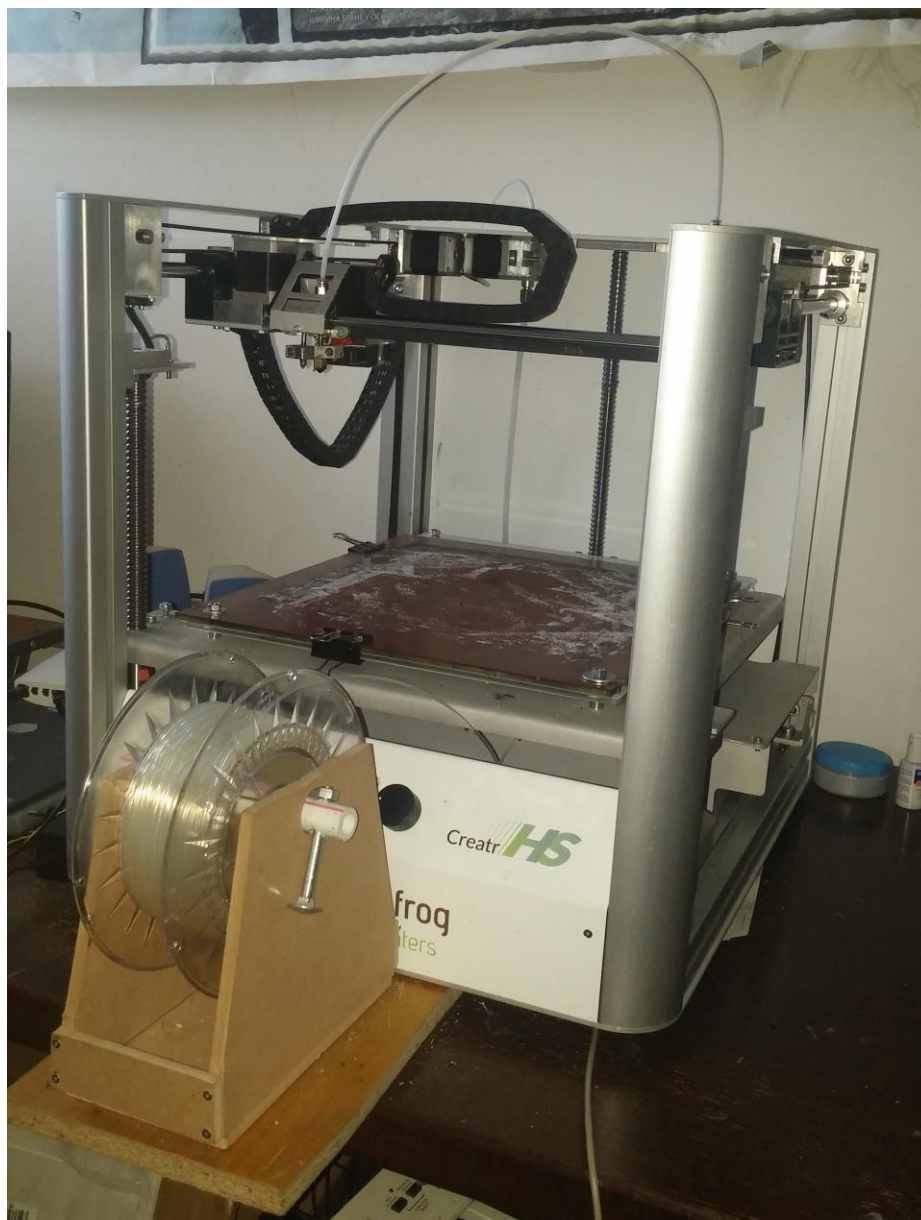


Слика 6.1. Изглед 3D модела опруге

Као улазни материјал код 3D штампача користи се пластична жица добијена процесом екструдирања, константног пречника, у овом случају $\varnothing 1.75\text{mm}$, и за израду једног оваквог модела потребно је око 1.5m жице. Опруге су израђене од две врсте комерцијалних пластичних жица:

- 1.ABS пластика
- 2.PLA пластика

Техника 3D штампе која је коришћена при изради је FDM (Fusion Deposition Modeling) метода, односно метода моделирања фузионим таложењем. Машина на којој је вршена 3D штампа је “Leap Frog Creatr HS” и приказана је на слици 6.2. На истој слици се може видети и екстудирана жица коришћена за израду опруге од PLA пластике. Недостатак оваквог начина штампања се огледа у томе што се између корака опруге лепи вишак материјала како би опруга могла да добије свој облик, тако да се тај вишак материјала мора накнадно одстранити када се штампање заврши.



Слика 6.2. Машина на којој је вршено 3D штампање – Leap Frog Creatr HS, Факултет инжењерских наука, опрема добијена у оквиру WIMB (543898-TEMPUS-1-2013-1-ES-TEMPUS-JPHES) Tempus пројекта

Коначан изглед опруга спремних за тестирање, након одстрањивања вишка материјала дат је на сликама 6.3 (опруга од ABS пластике) и 6.4 (опруга од PLA пластике).



Слика 6.3. Опруга од ABS пластике



Слика 6.4. Опруга од PLA пластике

Испитивање ове две опруге извршено је на универзалној машини за тестирање узорака на притисак “Brookfield CT3 Texture Analyzer”. На овој машини је могуће испитивање узорака на притисак притисном силом до 50кг са више врста различитих индентера у зависности од површине и тврдоће узорака који се испитују. Идентери су таквих профила да се дејство на површини узорка може извршити у тачки, по линији, или одређеном квадратном или цилиндричном површином. Поседује шест различитих модула за испитивање где се при бирању сваког модула може одабрати више опција:

- дефинисање укупног пута по вертикали након чега се индентер враћа у почетни положај
- дефинисање деформације након чега се индентер враћа у почетни положај
- достизање задате силе након чега се индентер враћа у почетни положај
- дефинисање дистанце до које индентер врши испитивање.

Код сваког модула који бирамо, као и задатог режима притиска дефинишемо и оптерећење које ће индентер достићи приликом продирања у узорак који испитујемо.

Оптерећења која су коришћена за овај експеримент су: 0,1kg, 0,3kg, 1kg, 3kg, 8kg, 20kg, 50kg.



Слика 6.5. Машина на којој су вршена испитивања – “Brookfield CT3 Texture Analyzer”, Факултет инжењерских наука, опрема добијена у оквиру WIMB (543898-TEMPUS-1-2013-1-ES-TEMPUS-JPHES) Tempus пројекта



Слика 6.6. Сет индентера различитих облика који се користе при испитивању

Следећи корак је софтверско подешавање индентера који је израђен у облику цилиндра, квадрата, сфере или другог одређеног облика који може бити израђен по потреби за нека одређена испитивања.

Затим је потребно подесити димензије узорка као и дефинисати контактне површине. Приликом уноса података треба дефинисати и силу којом ће индентер кренути са испитивањем, тј. да се тек при остваривању контакта индентера са површином испитиваног дела почети да се приказују резултати. Уз то је потребно подесити и брзину којом ће се алат кретати изражену у mm/s.

7. Анализа резултата добијених мерењем

Испитивања на машини су вршена под различитим оптерећењима у распону од 0,1kg до 50kg. Кретање алата се врши брзином од 1mm/s, са режимом деловања силе све док се не постигне максимална задата вредност и тада се алат враћа у почетни положај. Коришћени индентер је цилиндричног облика.



Слика 7.1. Приказ опруге и цилиндричног индентера

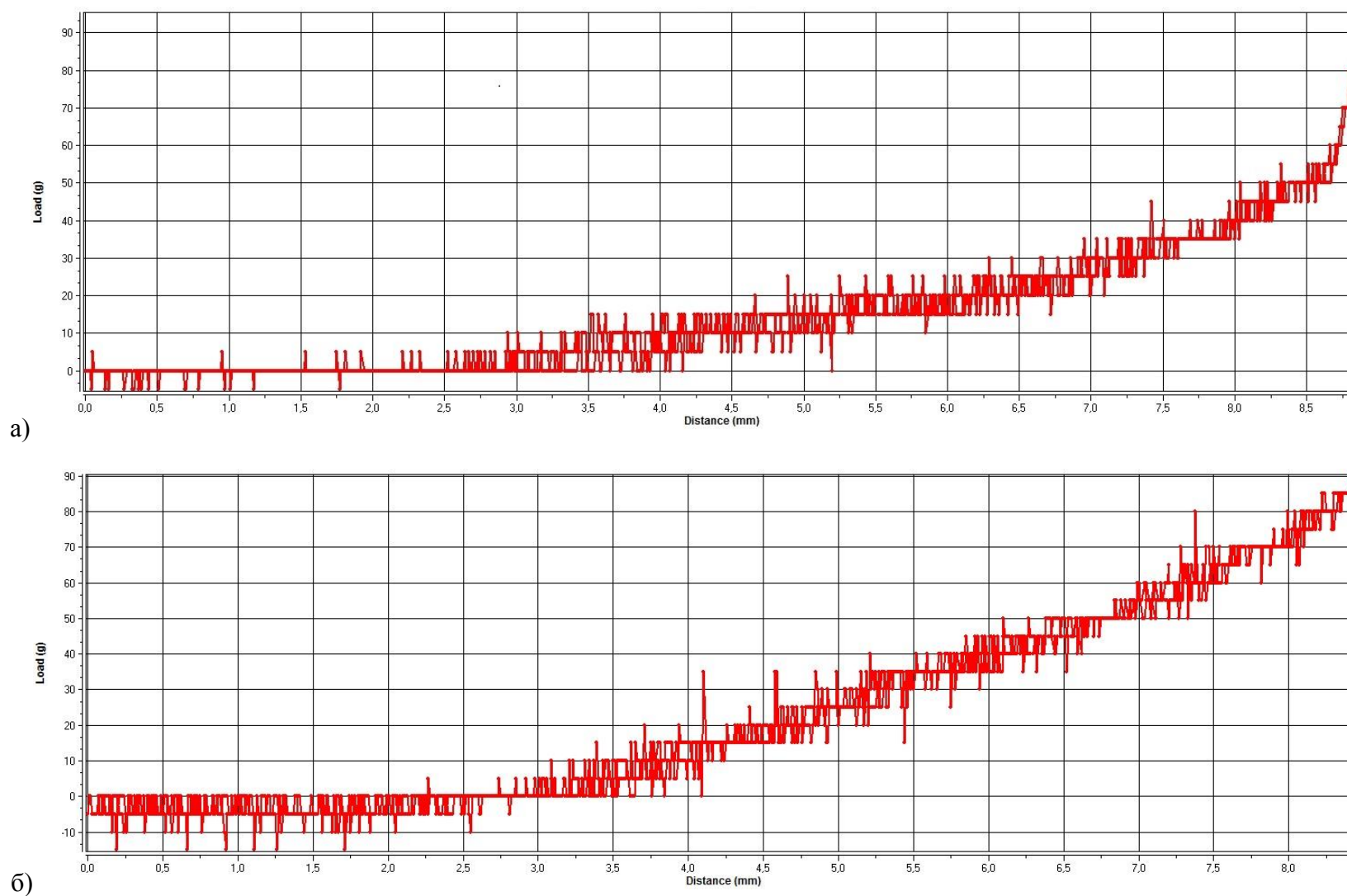
На слици 6.1. приказане су опруге са цилиндричним индентером који је коришћен за сва тестирања. Дијаграм зависности силе и дубине продирања индентера на вертикалној оси приказује вредност задате силе којом индентер притиска узорак, док је на хоризонталној оси приказано кретање индентера.

Испитивања су вршена у циљу одређивања тренутка у коме настаје трајна деформација, а затим упоређивање ове две опруге од различитих материјала како би се утврдило која има боља механичка својства. Резултати испитивања приказани су дијаграмима зависности силе од дубине продирања индентера.

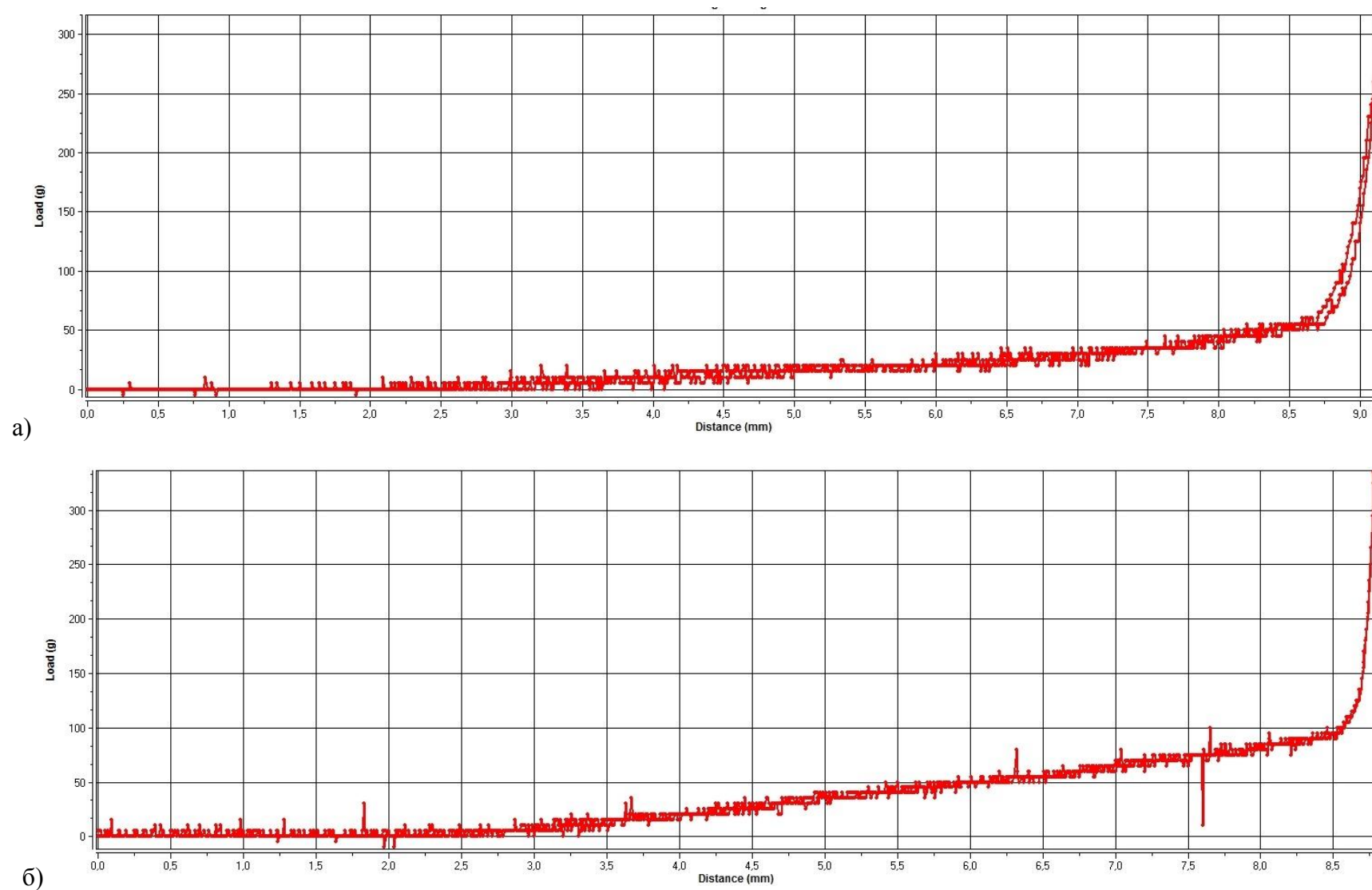
У табели 7.1 ће бити приказани улазни параметри коришћени за испитивање, као и задата оптерећења.

Улазни параметри машине							
Брзина кретања индентера	Врста индентера		Оптерећење при ком почиње мерење				
0.1 mm/s	цилиндрични		1g				
Ознака узорка	Задата оптерећења						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
ABS пластика	0.1kg	0.3kg	1kg	3kg	8kg	20kg	50kg
PLA пластика	0.1kg	0.3kg	1kg	3kg	8kg	20kg	50kg

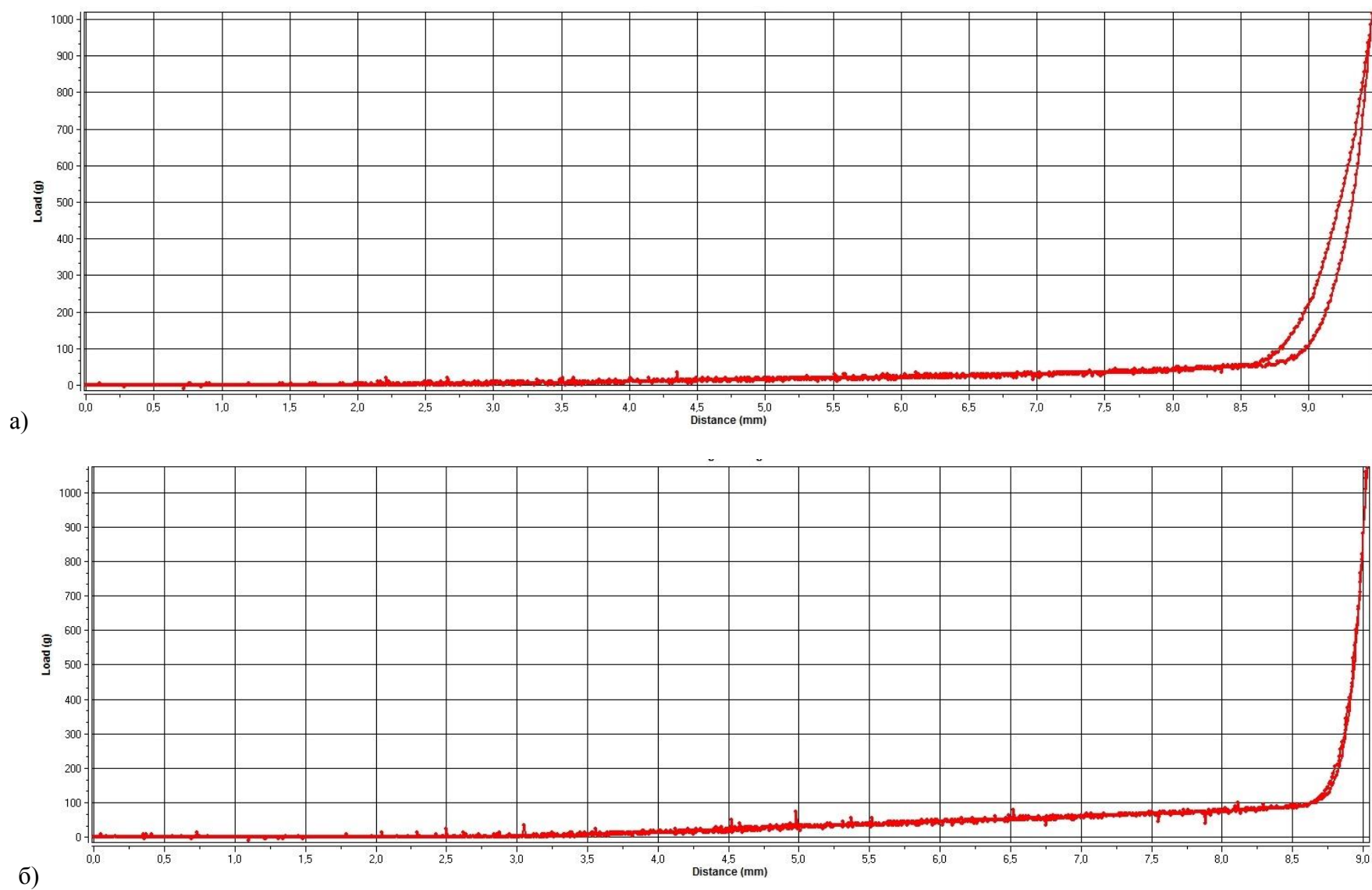
Табела 7.1. – Улазни параметри експеримента



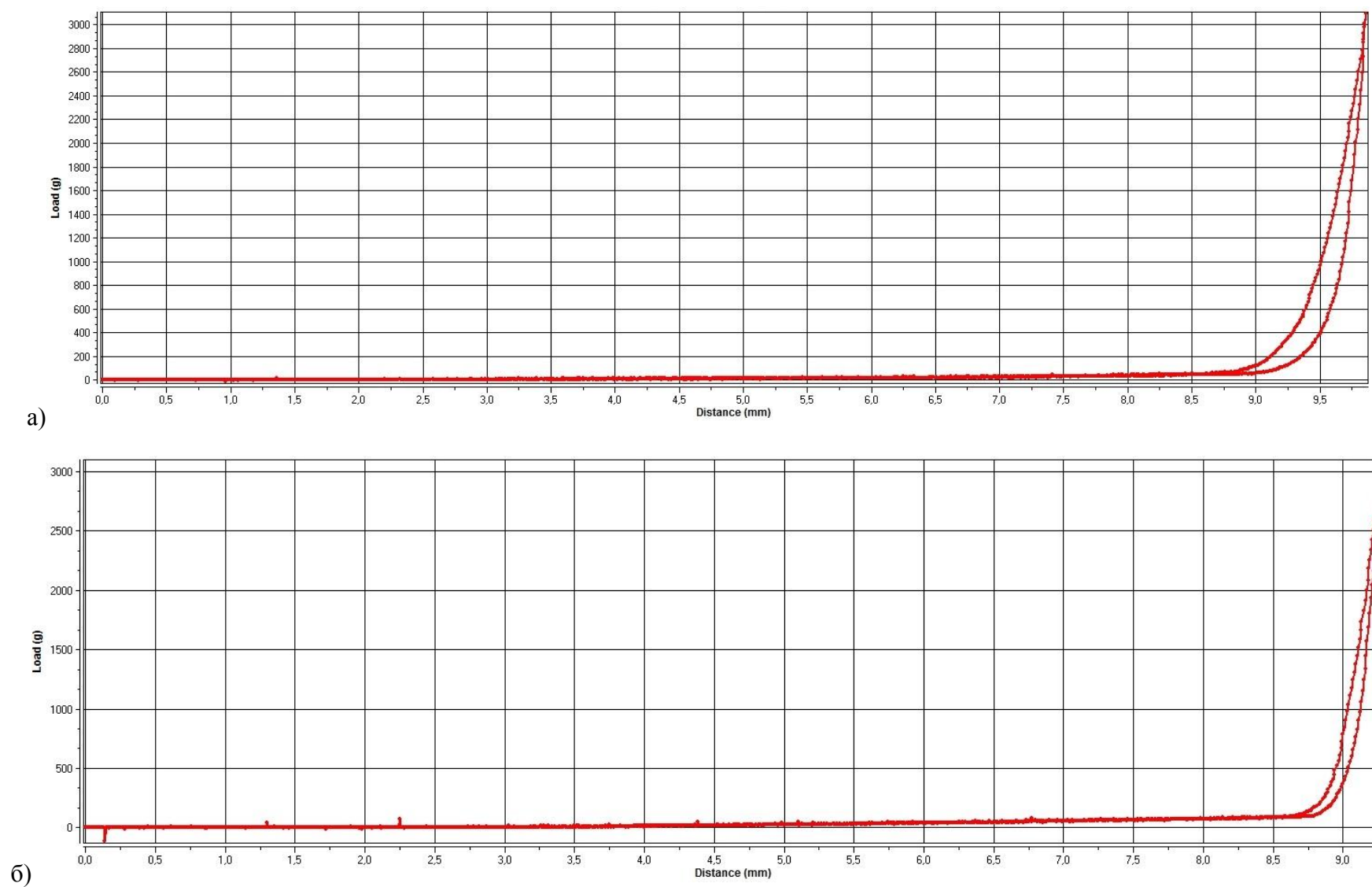
Слика 7.2. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 0.1kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику



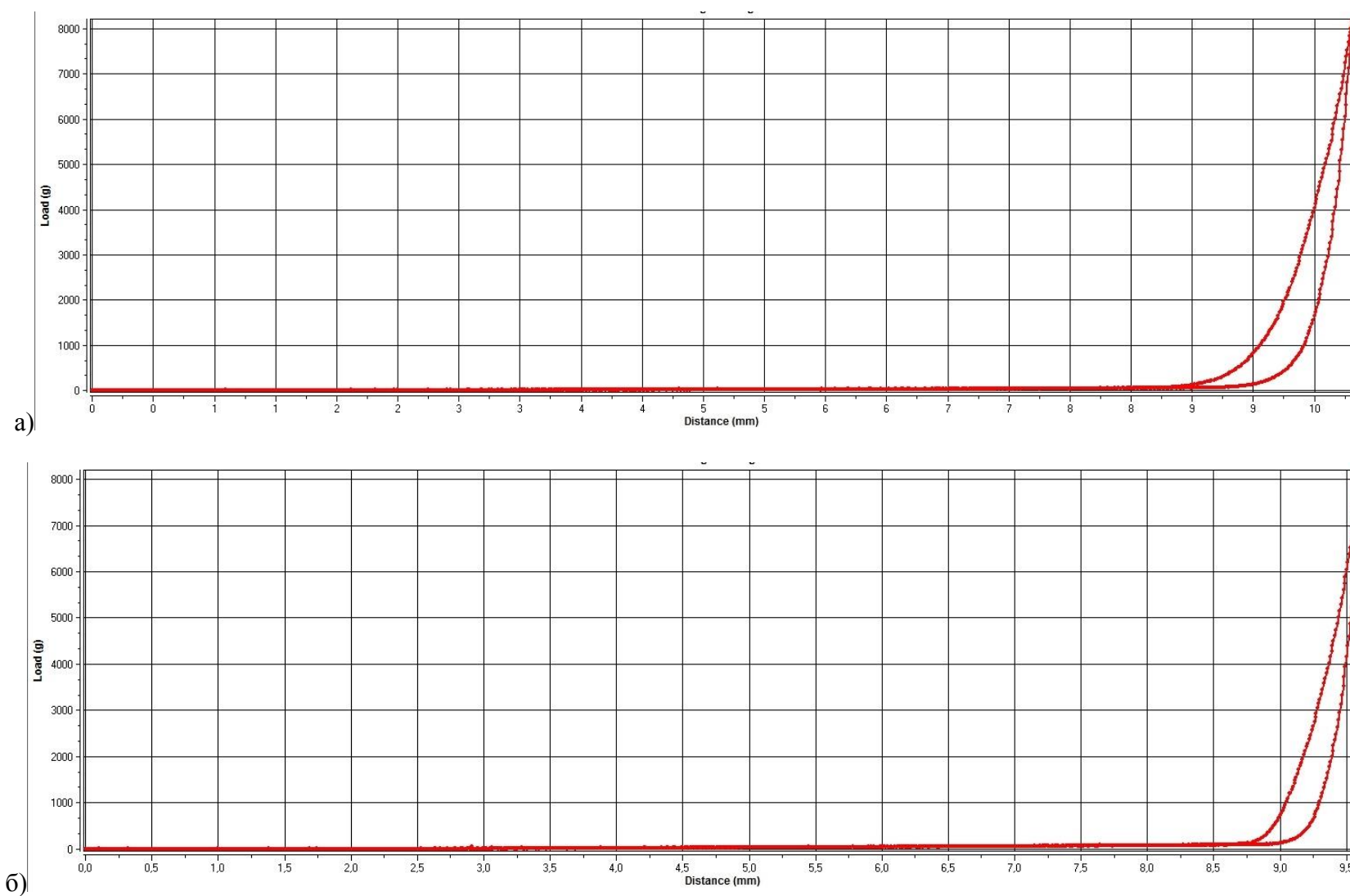
Слика 7.3. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 0.3kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику



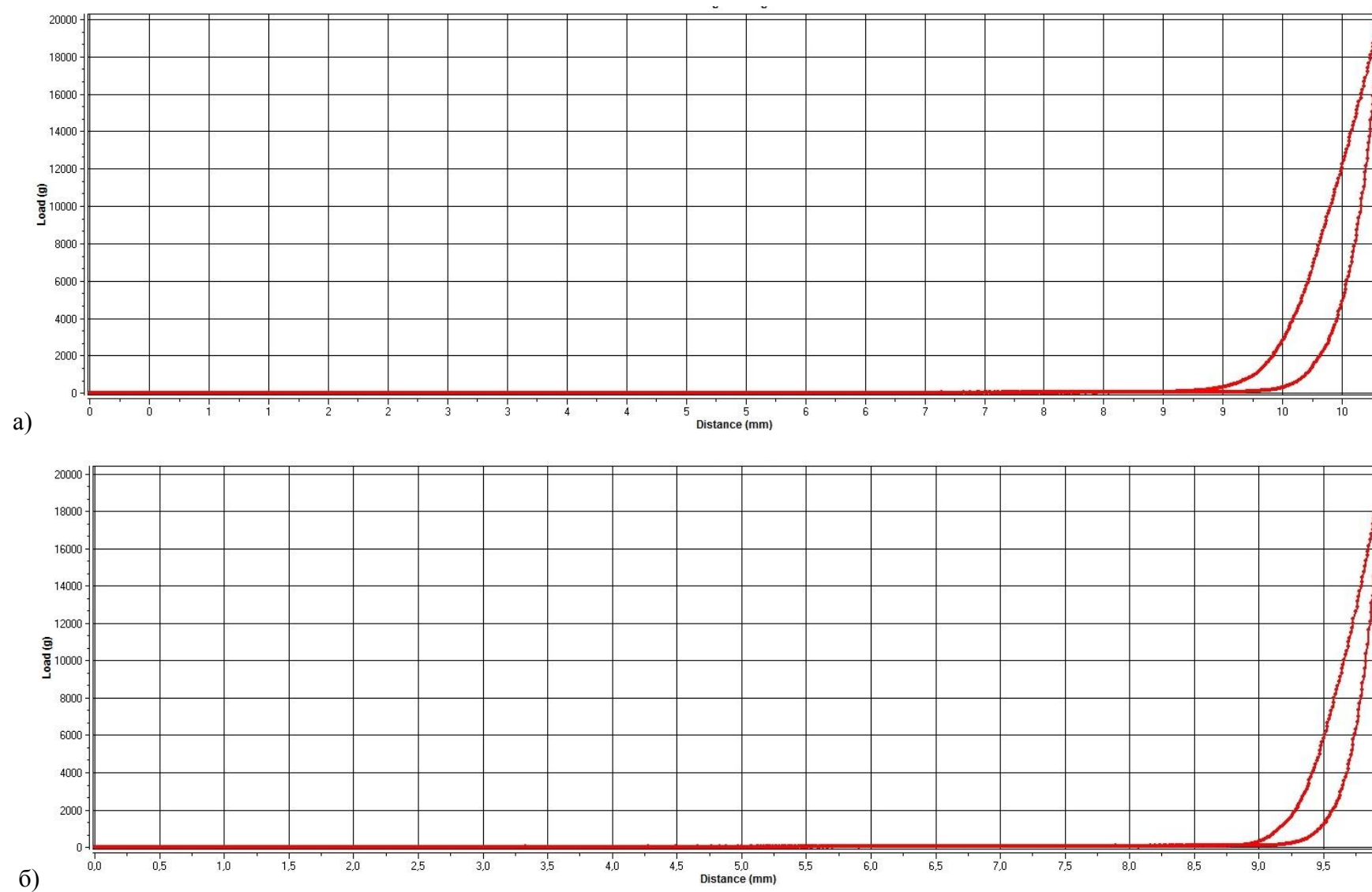
Слика 7.4. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 1kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику



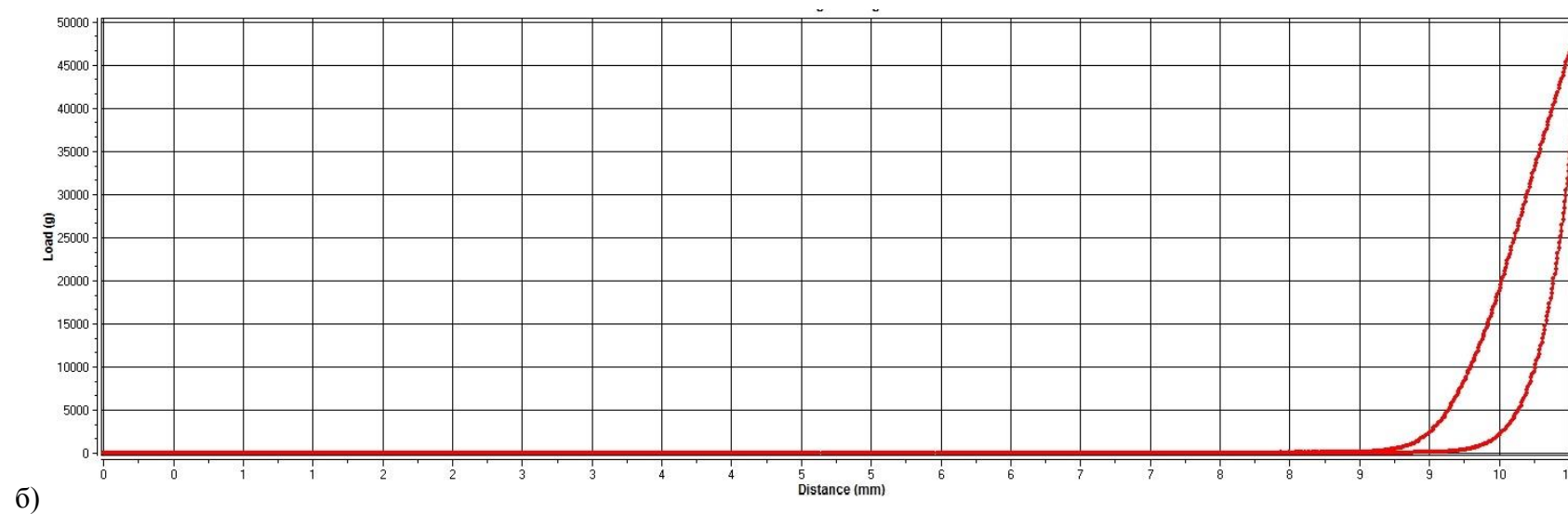
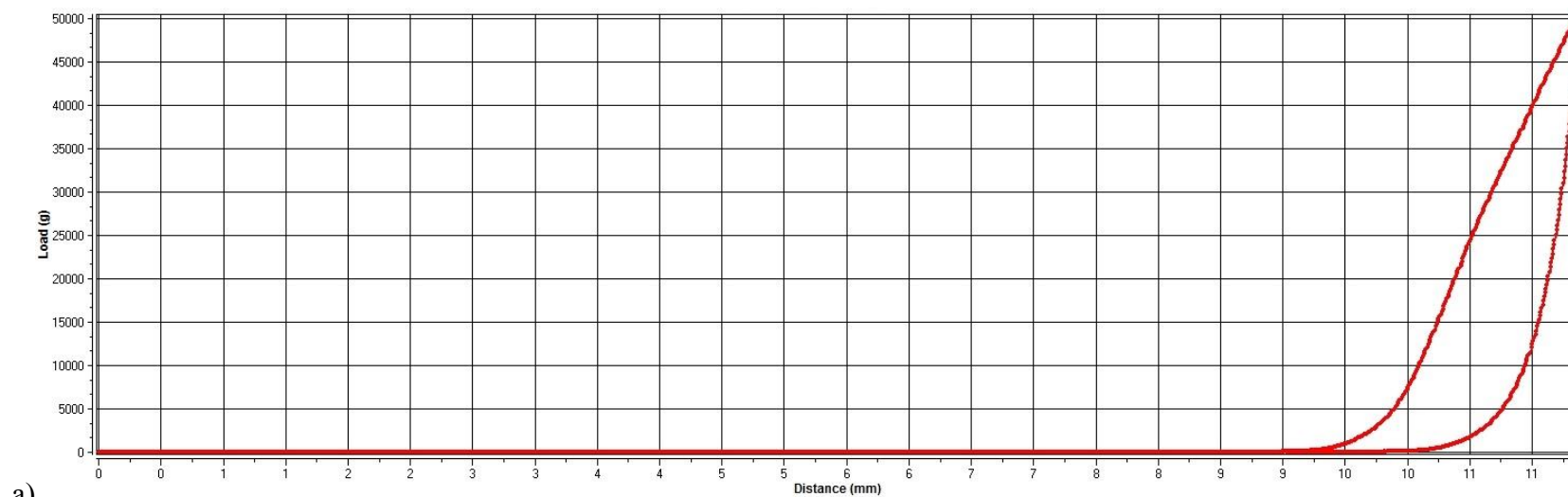
Слика 7.5. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 3kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику



Слика 7.6. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 8kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику



Слика 7.7. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 20kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику



Слика 7.8. Дијаграми зависности силе и дубине продирања при оптерећењу 50kg за: а)ABS пластику б)PLA пластику

Детаљним прегледом добијених дијаграма, као и упоређивањем истих можемо извршити упоређивање опруга од ABS и PLA пластике како бисмо закључили који материјал има боље механичке карактеристике. У експерименту се конкретно тражи да се упоређивањем дијаграма одреди која опруга ће издржати већу силу притиска.

У зависности од величине силе којом је опруга оптерећена, можемо видети тренутак када почиње да се јавља трајна пластична деформација и долази до појаве хистерезиса. Када је у питању опруга од ABS пластике види се да је веома мала трајна деформација настала већ при оптерећењу од 0.3kg, док се опруга од PLA пластике и при престанку силе притиска вратила у своје првобитно стање, где је дошло до појаве само еластичне деформације. Већ после овог дијаграма при веома малом оптерећењу можемо закључити да ће опруга од PLA пластике имати боље механичке карактеристике од ABS пластике и издржати веће оптерећење. Такође се може видети да се код опруге од PLA пластике јавља доста микропукотина на површинском слоју.

На дијаграму са слике 6.4 где су опруге оптерећене силом од 1kg, види се да је код опруге од ABS пластике трајна деформација добила још већу вредност, тј. да се хистерезис повећао, док опруга од PLA још увек остаје у првобитном стању, и даље код ње нема појаве пластичне деформације.

При сили од 3kg, хистерезис се код опруге од ABS пластике додатно повећао, док се код PLA опруге први пут јавља трајна деформација, али има доста мањи хистерезис у односу на ABS опругу при истој вредности силе.

Даљим мерењима са оптерећењима од 8kg, 20kg и 50kg можемо видети да се вредност пластичне деформације повећава код обе опруге. На крају мерења при сили од 50kg хистерезис код опруге од PLA пластике приближно је једнак хистерезису који се јавио код опруге од ABS пластике при оптерећењу од 20kg. При томе се и дефинитивно може закључити да опруга од PLA пластике има много боље механичке карактеристике од опруге од ABS пластике и може издржати много већа оптерећења од исте.

Упоређивањем добијених дијаграма са сликом 5.1 где је дат графички приказ карактеристика опруге, можемо закључити да је карактеристика опруга коришћених у експерименту прогресивна, тј. да крутост опруге расте.

Такође се може видети да су обе опруге издржале максимално оптерећење од 50kg и није досло до отказа, тј. пуцања истих. То значи да ове опруге могу издржати оптерећење где је вредност притисне силе већа од 50kg, али пошто је то максимална сила машине на којој смо вршили мерења, није било могуће одредити тренутак када би опруге потпуно пукле и изгубиле своју основну функцију.

На дијаграмима се може уочити да се на површини опруга јавило доста микропукотина, које би се даље могле проучавати.

Почетна дужина опруге од ABS пластике, пре првог теста на оптерећење била је 21.2mm, а након последњег теста при сили од 50kg њена дужина износила 19.9mm. Када је опруга од PLA пластике у питању, њена почетна дужина пре тестова је износила 20.2mm, док је по завршетку тестирања дужина била 19.7mm. Упоредивањем дужина после тестова оптерећења, видимо да је већу деформацију у дужини опруге претрпела опруга од ABS пластике.

8. Закључак

На основу датих дијаграма зависности силе и дубине продирања при различитим оптерећењима може се закључити да су обе опруге издржале оптерећење од 50kg и није дошло до пуцања истих.

Упоредивањем дијаграма ове две опруге, може се приметити да се код опруге од ABS пластике прво појавио хистерезис, односно трајна пластична деформација, и то већ при оптерећењу од 1kg. Даљим упоређивањем где су тестирања вршена при већим оптерећењима, може се и дефинитивно закључити да опруга од PLA пластике има боље карактеристике од опруге од ABS пластике и може издржати већу силу притискивања.

Овим тестовима се може закључити да је 3D штампа веома поуздана, и да опруге направљене на овај начин могу задовољити потребе за које су намењене. Машина на којој је вршено испитивање има максималну силу оптерећења од 50kg, тако да није било могуће да се изврши тестирање до тренутка када би опруга пукла и изгубила своја механичка својства, како би се одредила максимална сила коју опруга може да издржи до пуцања.

Литература

- [1] Bogdan Rapajić, Prerada plastičnih masa ekstrudiranjem, Beograd, 1976
- [2] Pierre G. Lafleur, Bruno Vergnes, Polymer extrusion, London, 2014
- [3] Walter Michaeli, Extrusion dies for plastics and rubber, Hanser University, 2012
- [4] <http://www.extruder-screw.com/en/screw-barrel-application/conical-twin-screws-barrels/a-2>, 08.11.2016
- [5] https://sr.wikipedia.org/sr/3D_штампа, 08.11.2016.
- [6] 3D штампачи, Рачунарски факултет, Београд, 2016
- [7] <http://www.3dmodel.rs/index.php/blog/8/entry-13-3d-stampaci/>, 08.11.2016.
- [8] <http://pcpress.rs/zlatne-ruke-3d-stampaca/>, 08.11.2016.
- [9] <https://all3dp.com/cool-things-to-3d-print-useful/>, 08.11.2016.
- [10] <http://inhabitat.com/83-year-old-woman-gets-the-worlds-first-3d-printed-jaw/>, 08.11.2016
- [11] Предавање из предмета Конструкцијски елементи 1, проф. Божидар Крижан, Технички факултет у Ријеци, 2014
- [12] Vera Nikolic, Mašinski elementi, Vera Nikolic, Kragujevac 2004
- [13] https://sh.wikipedia.org/wiki/Hukov_zakon, 08.11.2016.
- [14] <https://fizikica.wordpress.com/category/fizika-i/fizika-velikog-broja-molekula/hukov-zakon/>, 08.11.2016.
- [15] Yoshiro Yamada, Material for Springs, Japan Society of Spring Engineers (JSSE), Tokyo, 2007
- [16] Krisztian Kun, Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology, Procedia Engineering, Volume 149, Pages 203-211, 2016
- [17] Peter R.N. Childs, Chapter 15 – Springs, Mechanical Design Engineering Handbook, Pages 625-675, 2014